

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Теплоенергетичний факультет

Кафедра теоретичної і промислової теплотехніки

«На правах рукопису»
УДК 621.184.4

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Г.Б.Варламов
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 144 «Теплоенергетика»,

спеціалізації «Промислова та муніципальна теплоенергетика і енергозбереження»

на тему: Підвищення ефективності біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль»

Виконала: студентка II курсу, групи ТП – 61 м

_____ Гелету́ха Софі́я Гео́ргіївна
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н. Назарова І.О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультанти: з мат. моделювання к.т.н. Кутра Д.С.

(розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

(назва)

з охорони праці к.т.н., доцент Каштанов С.Ф.

(розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

(назва)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет Теплоенергетичний

Кафедра Теоретичної і промислової теплотехніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність 144 «Теплоенергетика»,

Спеціалізація «Промислова та муніципальна теплоенергетика і енергозбереження»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Г.Б.Варламов
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2018 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Гелетусі Софії Георгіївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Підвищення ефективності біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль»,

науковий керівник дисертації Назарова Ірина Олександрівна, к.т.н, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації 16.05.2018 р.

3. Об'єкт дослідження Біопаливна котельня аеропорту «Бориспіль»

4. Предмет дослідження Утилізація теплоти димових газів за рахунок глибокого охолодження у поверхнево-контактному економайзері

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Сучасний стан питання підвищення показників ефективності роботи біопаливних котелень. Розрахунок повного згоряння різних видів палива різної вологості. Визначення параметрів димових газів на вході в економайзер. Розрахунок температури точки роси димових газів на вході в економайзер. Тепловий розрахунок системи «котел-економайзер». Розрахунок екологічної ефективності системи «котел-економайзер». Зняття режимних параметрів біопаливної котельні та аналіз отриманих експериментальних даних. Моделювання процесу теплообміну в економайзері за допомогою програмного забезпечення Solid Works. Охорона праці. Розробка стартап-проекту.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу Теплова схема котельні. Таблиці результатів розрахунку повного згоряння різних видів палива різної вологості. Таблиці результатів розрахунків енергетичної, екологічної та економічної ефективності роботи котельні. Методика визначення температури точки роси.

Залежність температури у подаючому та зворотньому трубопроводах від температури навколишнього середовища. Залежності потужності економайзера від температури у подаючому та зворотньому трубопроводах та від вологості палива (експеримент). Результати моделювання процесу теплообміну в економайзері за допомогою програмного забезпечення Solid Works.

7. Орієнтовний перелік публікацій Тези доповідей на науково-технічних конференціях – 7.

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
мат. моделювання	Кутра Д.С., доцент		
охорона праці	Каштанов С.Ф., доцент		

9. Дата видачі завдання 19.03.2018 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Літературний огляд	19.03–23.03	
2.	Розрахунок повного згоряння різних видів палива різної вологості. Визначення параметрів димових газів на вході в економайзер. Розрахунок температури точки роси димових газів на вході в економайзер.	24.03–01.04	
3.	Тепловий розрахунок системи «котел–економайзер»	02.04–09.04	
4.	Розрахунок екологічної ефективності системи «котел–економайзер»	10.04–17.04	
5.	Підготовка та проведення серії експериментів. Обробка результатів експериментів	18.04–26.04	
6.	Моделювання за допомогою програмного забезпечення Solid Works.	27.04–30.04	
7.	Стартап-проект	01.05–06.05	
8.	Охорона праці	07.05–10.05	
9.	Оформлення та подання дисертації	11.05–16.05	

Студент

_____ (підпис)

С.Г. Гелету́ха
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

І.О. Назарова
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація на тему «Підвищення ефективності біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль»: 108 с., 43 рис., 29 табл., 8 додатків, 16 джерел.

Об'єкт дослідження – біопаливна котельня аеропорту «Бориспіль».

Мета роботи – аналіз енергетичної і екологічної ефективності роботи біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль».

Проаналізовано сучасний стан та перспективи розвитку сектору біоенергетики в Україні та основні способи підвищення екологічної ефективності роботи біопаливних котелень.

Визначено параметри димових газів на вході та виході з економайзера; встановлені залежності нижчої теплоти згоряння тріски та теоретично-максимального підвищення ККД системи «котел-економайзер» за рахунок утилізації теплоти димових газів від вологості палива; визначено значення температури точки роси димових газів.

Виконано розрахунок теплової схеми біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль», в результаті якого визначено показники енергетичної ефективності котла та системи «котел-економайзер». Встановлено залежності ККД котла, ККД системи «котел-економайзер», витрати палива від різної вологості палива. Визначено, що за рахунок встановлення економайзера втрати теплоти з димовими газами зменшуються на 14,6%; ККД котельні збільшується на 13,6% (з 86,1% до 99,7% за нижчою теплоотою згоряння). Встановлено вплив вологості палива на ККД котла, витрату палива в котлі, ККД системи «котел-економайзер».

Виконано екологічний розрахунок біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль». Розрахунковими методами, визначено валові викиди забруднювальних речовин та їх концентрації, які співставляються з результатами реальних замірів концентрацій викидів забруднювальних речовин в атмосферу біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль».

Під час експериментального дослідження роботи біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль», було оброблено дані 24 режимів роботи котельні у період січень-квітень 2017 року. Встановлено залежність потужності економайзера від потужності котла, температури вхідної води в економайзер, різниці температур води на вході та виході в економайзер; залежність температури у подаючому та зворотньому трубопроводах від температури навколишнього середовища.

Розроблено стартап проект «Встановлення економайзера для глибокого охолодження димових газів в біопаливних котельнях», в якому визначено економічну ефективність утилізації теплоти димових газів в економайзері – 3421 тис. грн/рік та термін окупності – 3,3 року.

На базі програмного забезпечення Solid Works побудовано геометричну модель економайзера, перевірено коректність комп'ютерного моделювання, досліджено теплообмін між потоками рідини в економайзері та визначено розподіл температур для варіантів: без перегородок по ходу робочого тіла – води, та з ними.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: водогрійний котел, біопаливна котельня, біопаливо, дерев'яна тріска, димові гази, економайзер, теплові втрати, валові викиди, стартап проект, охорона праці.

АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация на тему «Повышение эффективности биотопливной котельной аэропорта «Борисполь»: 108 с., 43 рис., 29 табл., 8 приложений, 16 источников.

Объект исследования – биотопливная котельная аэропорта «Борисполь».

Цель работы – анализ энергетической и экологической эффективности работы биотопливной котельной аэропорта «Борисполь».

Проанализировано современное состояние и перспективы развития сектора биоэнергетики в Украине, основные способы повышения экологической эффективности работы биотопливных котельных.

Определены параметры дымовых газов на входе и выходе из экономайзера; установлены зависимости низшей теплоты сгорания щепы, теоретически максимального повышения КПД системы «котел-экономайзер», за счет утилизации теплоты дымовых газов, от влажности топлива; определены значения температуры точки росы дымовых газов.

Выполнен тепловой расчет котельной, в результате которого определены показатели энергетической эффективности котла и системы «котел экономайзер». Установлены зависимости КПД котла, КПД системы «котел-экономайзер», расхода топлива от различной влажности топлива. Определено, что за счет установки экономайзера потери теплоты с дымовыми газами уменьшаются на 14,6% (по низшей теплоте сгорания); КПД котельной увеличивается на 13,6% (с 86,1% до 99,7% по низшей теплоте сгорания). Установлено влияние влажности топлива на КПД котла, на расход топлива в котле, на КПД системы «котел-экономайзер».

Выполнен экологический расчет котельной. Расчетно определены валовые выбросы загрязняющих веществ и их концентрации, сопоставляются с результатами реальных замеров концентраций выбросов загрязняющих веществ в атмосферу биотопливной котельной аэропорта «Борисполь».

Во время экспериментального исследования работы биотопливной котельной аэропорта «Борисполь», было обработано данные 24 режимов работы котельной в период январь-апрель 2017 года. Установлена зависимость мощности экономайзера от мощности котла, температуры входящей воды в экономайзер, разницы температур воды на входе и выходе в экономайзер; зависимость температуры в подающем и обратном трубопроводах от температуры окружающей среды.

Разработан стартап проект «Установка экономайзера для глубокого охлаждения дымовых газов в биотопливных котельных», в котором определена экономическая эффективность утилизации теплоты дымовых газов в экономайзере – 3421 тыс. грн/год и срок окупаемости – 3,3 года.

На базе программного обеспечения Solid Works построено геометрическую модель экономайзера, проверено корректность компьютерного моделирования, исследован теплообмен между потоками жидкости в экономайзере для вариантов: без перегородок по ходу рабочего тела – воды, и с ними.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водогрейный котел, биотопливная котельная, биотопливо, деревянная щепа, дымовые газы, экономайзер, тепловые потери, валовые выбросы, стартап проект.

SUMMARY

Master's thesis on “Boryspil airport biofuel boiler house efficiency increment”: 108 pages, 43 figures, 29 tables, 8 applications, 16 sources.

The object of the research is the biofuel boiler house of the Boryspil airport. The purpose of the work is to analyze the energy and ecological efficiency of the Boryspil airport biofuel boiler house.

Current state and prospects of the bioenergy sector development in Ukraine and the main ways of increasing the ecological efficiency of the biofuel boiler houses were analyzed.

Parameters of flue gas at the input and output from the economizer are determined; the dependencies of the lower calorific combustion, theoretically maximum efficiency increment of the boiler-economizer system, due to utilization of the heat of flue gases, vs. the moisture content of the fuel; the value of the temperature of the point of dew of flue gases is determined.

According to the results of cycle arrangement calculations of the boiler house of Boryspil airport, the indicators of the energy efficiency of the boiler and the system “boiler-economizer” were determined. The dependencies of the boiler efficiency, of the system “boiler-economizer” efficiency, of the fuel consumption from different fuel humidity, is defined. By establishing an economizer the heat losses with exhaust gas decreases, which leads to increase of efficiency of the system. Efficiency factor increased by 13.6%, from 86.1% to 99.7% (by lower calorific value). The influence of fuel humidity on the efficiency of the boiler, fuel consumption in the boiler, the efficiency of the boiler-economizer system is defined.

Ecological calculation of biofuel boiler-house of Boryspil airport is executed. Estimated gross emissions of pollutants and their concentration were compared with the results of real measurements of pollutants concentrations of the Boryspil airport biofuel boiler house flue gases.

During the case study of the operation of the biofuel boiler-house of the Boryspil airport, 24 boiler operation modes were processed during January-April 2017. The dependence of the economizer's power on the boiler's power, on the temperature of the input water into the economizer, on the difference in water temperature at the inlet and in the outlet in the economizer, on the ambient temperature was established.

A startup project “Establishing an economizer for the flue gases deep cooling in biofuel boiler houses” was developed. Economic efficiency of utilizing the flue gases heat in the economizer is 3421 thousand UAH/year and the payback period is 3.3 years.

On the basis of Solid Works software, a geometric model of the economizer was constructed, the computer simulation was checked, the heat exchange between fluid flows in the economizer was investigated and the temperature distribution was determined for the variants without partitions along the water, and with them.

Technical solutions and organizational measures for the safe operation of process equipment, for the safety and occupational health and industrial hygiene, are proposed; the basic measures of fire safety and prevention are defined.

KEYWORDS: biofuel boiler house, biofuel, wood chips, flue gases, economizer, heat losses, gross emissions, startup project, occupational health, and safety.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів	8
Вступ	8
1 Способи підвищення ефективності біопаливних котелень (Літературний огляд).....	10
1.1 Сучасний стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні	10
1.2 Загальна характеристика теплоутилізаційних технологій біопаливних котелень	13
1.3 Способи підвищення екологічної ефективності котелень	14
1.4 Вартісна оцінка системи очистки продуктів згорання біомаси	18
1.5 Постановка задачі та шляхи її реалізації	20
2 Теплова схема біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль»	22
2.1 Опис теплової схеми.....	22
2.2 Розрахунок повного згорання дерев'яної тріски	24
2.3 Визначення параметрів димових газів на виході з котлів –вході в економайзер	31
2.5 Розрахунок температури точки роси димових газів на вході в економайзер	33
2.6 Висновки до розділу 2	36
3 Тепловий розрахунок системи «котел-економайзер» та її елементів.....	37
3.1 Методика розрахунків теплового балансу системи «котел-економайзер» та її елементів.....	37
3.2 Розрахунок теплового балансу котлоагрегату	40
3.3 Розрахунок теплового балансу системи «котел-економайзер»	44
3.4 Енергетична ефективність від встановлення економайзера	47
3.5 Висновки до розділу 3	49
4 Екологічний розрахунок системи “котел-економайзер” та її елементів	51
4.1 Методика визначення викидів забруднюючих речовин біопаливної котельні.....	51
4.2 Визначення викидів забруднюючих речовин біопаливної котельні аеропорту “Бориспіль”	53
4.3 Висновки до розділу 4	58
5 Експериментальні дослідження роботи біопаливної котельні аеропорту “Бориспіль”	60
5.1 Опис експериментів на економайзері Enerstena CEB 1000	60
5.2 Опис результатів експериментів на економайзері Enerstena CEB 1000	61
5.3 Висновки до розділу 5	66
6 Математичне моделювання процесу теплообміну в економайзері.....	67
6.1 Постановка задачі	67
6.2 Геометричне моделювання	68
6.3 Проведення експериментів	70
6.4 Висновки до розділу 6	76
7 Розробка стартап проекту	77

8 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	85
8.1 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки експлуатації технологічного обладнання твердопаливної котельні.	85
8.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії.....	89
8.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях	91
Список використаної літератури	95
Висновки	96
Додаток А Технічне завдання на науково-дослідну роботу.....	95
Додаток Б Акт впровадження результатів магістерської дисертації.....	97
Додаток В Список наукових праць.....	98
Додаток Г Теплова схема біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль»	101
Додаток Д Режимна таблиця роботи економайзера СЕВ 1000 біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль».....	102
Додаток Е Результати вимірів концентрацій забруднюючих речовин в атмосферне повітря біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль».....	103
Додаток Ж Мнемосхеми пульту управління біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль» у кількості —	24
шт.....	105
Додаток З Витяг із звіту по перевірці магістерської дисертації на академічний плагіат в системі Unichesk.....	108

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Позначення:

Q – теплова потужність;	φ – коефіцієнт збереження тепла
B – витрата палива;	α – коефіцієнт тепловіддачі;
V – об’ємна витрата;	d – вологовміст;
G – масова витрата;	E – масовий викид забруднюючої речовини;
ΔP – гідравлічний або аеродинамічний опір;	q – Втрати теплоти з відхідними газами;
t – температура;	k – показник емісії;
Δt – температурний перепад;	l – довжина;
ρ – густина;	h – висота;
c – теплоємність;	C – ціна;
η – ККД;	K – капіталовкладення;
I – ентальпія;	n – кількість діб;
F – площа;	Z – термін окупності.

Індекси нижні:

p – парціальний;
 vx – на вході;
 2 – димові гази;
 d – дійсний;
 s – сухі;
 $пов$ – повітря;
 $пр. зг$ – продукти згоряння;

Індекси верхні:

H – навколишня;
 k – котел;
 vx – на вході;
 $вих$ – на виході;
 $пр. зг.$ – продукти згоряння;
 $г$ – димові гази;
 $с.г.$ – сухі димові гази.

Скорочення:

ККД – коефіцієнт корисної дії;
 ГВП – гаряче водопостачання;
 ТЕ – теплова енергія;
 НПДВЕ – Національний план дій з відновлюваної енергетики
 ТКЕ – теплокомуненерго
 ВДЕ – відновлювальні джерела енергії

ВСТУП

Згідно Енергетичної стратегії України до 2035 року [1], Україна має намір скоротити споживання викопного палива та збільшити частку відновлюваних джерел енергії з 4% (у 2016 р.) до 25% (у 2035 р.) від загального обсягу постачання первинної енергії. В Україні, в останні роки, частка біомаси від усіх відновлюваних джерел енергії становить 81%, і згідно [2], ця частка залишиться основною і в майбутньому. Отже, проекти, що заміщують викопне паливо (вугілля, природний газ) біомасою є актуальними в Україні зараз і їх кількість буде збільшуватися в майбутньому.

Проблеми енергозбереження та покращення умов довкілля стали пріоритетними в світовій енергетичній практиці. Основними напрямками вирішення цих нагальних проблем, зокрема в малій енергетиці, є покращення екологічності котельних установок та підвищення ефективності використання в них палива. Актуальність наукових завдань за вказаними напрямками зростає у зв'язку з неуклінним дорожчанням палива та посиленням вимог щодо зменшення забруднення навколишнього середовища такими тепловими установками.

Одними з найактуальніших завдань, що стоять перед державою останніми роками, є скорочення споживання дорогого імпортного палива – природного газу, а також збільшення частки використання відновлюваних джерел енергії. У зв'язку з вирівнюванням тарифів на природний газ та підняттям тарифів на теплову енергію економічна доцільність заміщення газу біомасою постійно зростає. Основною можливістю залучення біомаси в енергосектор, на сьогодні, полягають у її використанні у якості палива при виробництві теплової енергії для забезпечення потреб споживачів в опаленні та гарячому водопостачанні.

В Україні актуальним на сьогодні питанням – є розробка та впровадження енергозберігаючих теплотехнологій у секторі виробництва теплової енергії з біомаси, що дозволять знизити рівень енергоспоживання на одиницю національного валового продукту. Однією з таких теплотехнологій є утилізація теплоти димових газів за рахунок глибокого охолодження продуктів згорання.

В роботі передбачається проаналізувати роботу водогрійної опалювальної котельні, в якій встановлено водогрійний твердопаливний котел виробництва корпорації ІНКА (Харків), тепловою потужністю 5000 кВт та економайзер для глибинного охолодження димових газів групи компаній Enerstena (Литва), тепловою потужністю 1000 кВт.

Метою даної роботи є аналіз енергетичної і екологічної ефективності роботи біопаливної котельні в аеропорту «Бориспіль».

1 СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БІОПАЛИВНИХ КОТЕЛЕНЬ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)

1.1 Сучасний стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні

Біомаса є перспективним джерелом енергії як у світі, так і в Україні. Протягом останніх років в Україні спостерігається поступове зростання кількості об'єктів і встановленої потужності для виробництва теплової та електричної енергії з біомаси.

Згідно даних енергетичного балансу України [2] частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у загальному кінцевому енергопостачанні у 2016 р. склала 5,8% (у 2015 р. ця доля склала 4,9%). Такий темп зростання відповідає європейським показникам річного росту сектору ВДЕ.



Рисунок 1.1 — Частка відновлюваних джерел енергії у загальному кінцевому енергоспоживанні в Україні у 2010-2016 роках [3]

Як і у попередньому році, у структурі виробництва енергії з ВДЕ у 2016 р. найвагомішу частку займали біопаливо та відходи – 81%. Наведені дані показують черговий значний крок у розвитку сектору біоенергетики України. Так, обсяг «виробництва біопалив та відходів» становив 3348 тис. т н.е. у 2016 р. (проти 2606 тис. т н.е. у 2015 р.), а обсяг «загального постачання первинної енергії з біопалив та відходів» – 2832 тис. т н.е. у 2016 р. (проти 2102 тис. т н.е. у 2015 р.) (рис. 1.2). Різниця між зазначеними показниками відповідає експорту біопалив – 553 тис. т н.е. у 2016 р. (539 тис. т н.е. у 2015 р.). Постачання первинної енергії з біопалив та відходів в обсязі 2832 тис. т н.е. еквівалентно заміщенню близько 3,5 млрд. м³ природного газу у 2016 році.

Аналіз аналогічних даних за період 2010-2016 р.р. (рис 1.2) свідчить про те, що середній темп росту сектору біоенергетики в Україні складає 45% на рік за показником «виробництво біопалив та відходів» і 35% на рік за показником «загальне постачання первинної енергії з біопалив та відходів». Такі темпи розвитку вказують на високу ймовірність виконання цілей по виробництву теплової енергії з біомаси, зазначених в Національному плані дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року (НПДВЕ), що затверджений Урядом.

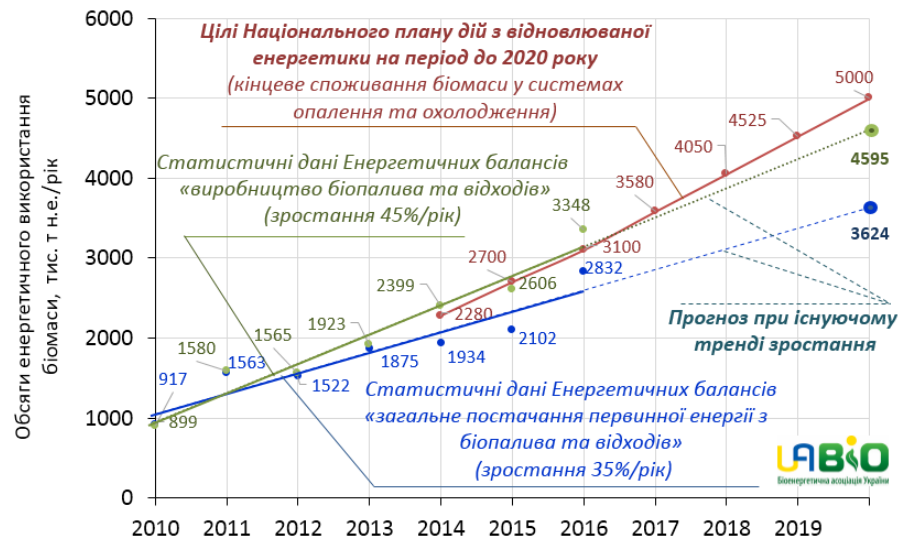


Рисунок 1.2 — Зростання виробництва енергії з біопалив в Україні протягом 2010-2016 рр., індикативні цілі НПДВЕ по виробництву теплової енергії з біомаси та прогноз до 2020 р.

Розвиток сектора виробництва теплової енергії з біомаси передбачений також "Енергетичною стратегією України до 2035 року" [1], що схвалена Урядом. Згідно стратегії планується оптимізація структури енергетичного балансу держави, виходячи з вимог енергетичної безпеки та забезпечення частки ВДЕ у постачанні первинних ресурсів на рівні 25% у 2035 році. Водночас взяті Україною міжнародні зобов'язання та цілі забезпечення сталого розвитку накладають на національну економіку та енергетичний сектор низку обмежень щодо необхідності інноваційного оновлення енергетичного сектора, розширення використання відновлюваних джерел енергії, зниження енергоємності національної економіки, впливу енергетики на навколишнє середовище тощо. Загальний прогнозний енергетичний баланс України на період до 2035 року наведений у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 — Прогнозний баланс загального постачання первинної енергії на період до 2035 р. Згідно до "Енергетична стратегія України до 2035 року" [1]

Показники	2015	2020	2025	2030	2035
Постачання енергії (всього), млн т н.е.	90,1	82,3	87	91	96
Біомаса, біопаливо та відходи, млн т н.е.	2	4	6	8	11
Частка біомаси та відходів, %	2,2	4,9	6,8	8,8	11,5
Частка ВДЕ у постачанні первинних ресурсів, %	4	8	12	17	25
Частка місцевих альтернативних видів палива в місцевих паливно-енергетичних балансах, % до загального споживання	-	10	15	18	20

Згідно "Концепції реалізації державної політики у сфері теплопостачання", що схвалена Урядом [4], в період 2019-2025 р. планується досягти 30% частки використання альтернативних джерел енергії в загальному балансі систем теплопостачання, а в період 2026-2035 р. – до 40%.

На основі проведених досліджень ринку котлів на біопаливі було визначено, що станом на березень 2016 р. загальна встановлена потужність котелень на біомасі становила понад 1500 Гкал/год. Розрахункове виробництво теплової енергії складає близько 2,6 млн Гкал (261 тис. т н.е.) або 3,6% від загального виробництва теплової енергії на котельнях. На даний час лише до 20% біопаливного обладнання встановлено на підприємствах комунального теплопостачання, а в системах централізованого опалення та постачання гарячої води – до 5%. В останні роки кількість котлів на біопаливі в ТКЕ зросло, що пов'язано з політикою економії коштів та впровадженням рахунків зі спеціальним режимом використання для зарахування коштів, які надходять за спожитим газ. Найбільший ріст частки ВДЕ у кінцевому споживанні спостерігається в секторі теплоенергії (рис. 1.3). У 2016 році частка енергії, вироблена з відновлюваних джерел, у виробництві та відпуску теплової енергії склала 4,9% (рис. 1.4).



Рисунок 1.3 — Частка відновлюваних джерел енергії у кінцевому споживанні за секторами в Україні у 2010-2016 роках [5]

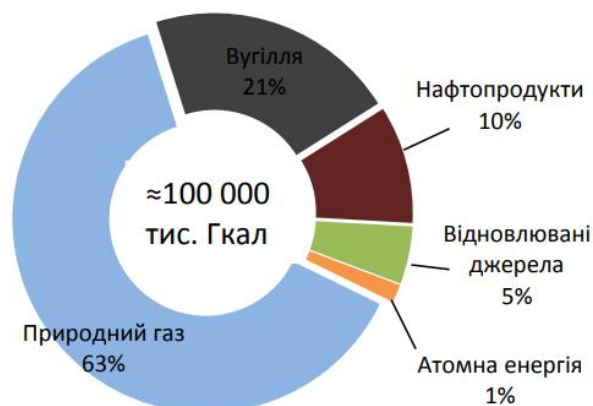
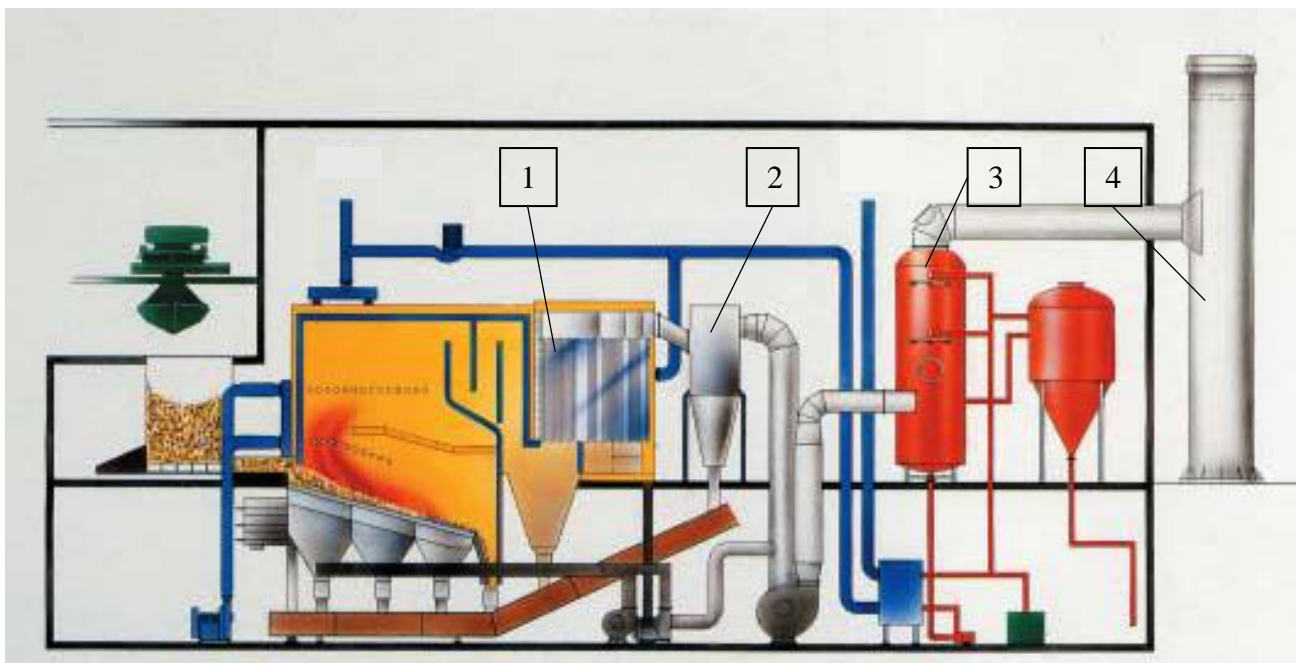


Рисунок 1.4 — Структура виробництва та відпуску теплової енергії в Україні у 2016 році

Отже, частка ВДЕ у загальному кінцевому енергопостачанні у 2016 р. в Україні склала 5,8%, з яких 4,6% склала доля біопалива та відходів. Середній темп росту сектору біоенергетики в Україні складає 45% на рік за показником «виробництво біопалив та відходів» та індикативна ціль частки біомаси та відходів у 2035 році, згідно "Енергетичної стратегії України до 2035 року", становить 11,5%. Найбільший ріст частки ВДЕ відбувається в секторі теплопостачання, де існує невичерпаний потенціал виробництва енергії з біопалив в системах централізованого теплопостачання. Отже, дослідження роботи біопаливних котелень централізованого теплопостачання – є актуальним питанням.

1.2 Загальна характеристика теплоутилізаційних технологій біопаливних котелень

Практика утилізації теплоти димових газів широко розповсюдженна в Литві, Данії та інших зарубіжних країнах. Наприклад більшість станцій централізованого теплопостачання, що спалюють деревну тріску в Данії були обладнані системами конденсації димових газів або вже мали ці системи при будівництві котельні. У Тьуборен (Thyborøn), Данія централізоване теплопостачання здійснюється біопаливною котельнею, з котлом потужністю 4 МВт, що спалює деревну тріску. Система конденсації димових газів виробляє додатково 0,8 МВт тепла при вологості деревної тріски 50% (рис 1.5).



1 – біопаливний котел; 2 – економайзер; 3 – мультициклон; 4 – димова труба

Рисунок 1.5 — Схема біопаливної котельні з утилізатором теплоти відхідних газів

Системи конденсації димових газів можуть використовуватися на теплових станціях і котельнях, що працюють на біопаливі. Технологія утилізації теплоти димових газів дозволяє

очистити димові гази від твердих часток майже до рівня тканинних фільтрів і, в той же час, збільшити ККД котельні. Як і більшість інших палив, деревина містить водень. Разом з киснем повітря водень при спалюванні перетворюється в пари води, які складають частину димових газів поряд з іншими продуктами згоряння. Більш того, деревна тріска, яка використовується на станціях централізованого теплопостачання, зазвичай має вологість 40-55% від загальної ваги. При спалюванні ця волога також перетворюється на водяну пару в димових газах.

Слід зазначити, що в Україні і в інших країнах проблемою глибокої утилізації теплоти відхідних газів займаються вже понад 50 років. Ця проблема досить глибоко вивчена, розроблені і впроваджені у виробництво високоефективні утилізаційні установки та конденсаційні котли. Проте, такі розробки переважно пов'язані з котельними працюючими на природному газі. Це пов'язано з історичною дешевизною і високою доступністю природного газу і мазуту, з недостатньою зацікавленістю підприємств енергетики і промисловості в економії палива, з відсутністю необхідних коштів на розробку, виробництво і впровадження теплоутилізаційного обладнання для біопаливних котелень. В умовах все більш зростаючого дефіциту традиційного енергетичного палива становище з впровадженням високоефективних теплоутилізаційних технологій для біопаливних котелень повинно докорінно змінитися.

Отже, в Україні актуальним на сьогодні питанням – є розробка та впровадження енергозберігаючих теплотехнологій у секторі виробництва теплової енергії з біомаси.

1.3 Способи підвищення екологічної ефективності котелень

1.3.1 Характеристика основних викидів біопаливних котелень

Основними забруднюючими речовинами, що утворюються в процесі енергетичного використання біомаси, є оксиди азоту (NO_x), оксид вуглецю (CO), оксиди сірки (SO_x), сполуки хлору та тверді частки.

Перелік основних забруднюючих речовини в продуктах згоряння та їх вплив на клімат, навколишнє середовище та здоров'я людей наведений у таблиці 1.2.

З метою недопущення значного забруднення атмосферного повітря продуктами згоряння, необхідно здійснювати постійний контроль за викидами забруднюючих речовин, вживати заходи і застосовувати пристрої для їх ефективного вловлювання, знешкодження та утилізації, що дозволить дотримуватися встановлених санітарних нормативів допустимого вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі.

Таблиця 1.2 — Основні компоненти продуктів згоряння біомаси та їх вплив на клімат, навколишнє середовище та здоров'я людей

Компонент	Джерело утворення	Екологічний вплив
Оксид вуглецю (CO)	Неповне згоряння всіх видів паливної біомаси	Клімат: Газ непрямої парникової дії (ГНПД), впливає на утворення озону Здоров'я: Може викликати напади задухи у разі накопичення в закритих приміщеннях
Тверді частки	Сажа та конденсат важких вуглеводнів (дьоготь), що утворюються при неповному згорянні усіх видів паливної біомаси. Золіві частки	Клімат і навколишнє середовище: Зворотний парниковий ефект через утворення аерозолів. Непрямий ефект – можливий значний вміст важких металів у завислих частках Здоров'я: Негативний вплив на систему органів дихання людини
Оксиди азоту ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$)	Побічний продукт згоряння всіх видів паливної біомаси. За певних умов додаткова кількість NO_x може утворюватися з азоту повітря	Клімат і навколишнє середовище: Непрямий парниковий ефект через вплив на утворення озону. Зворотний парниковий ефект через утворення аерозолів. Кислотні опади. Призводить до загибелі рослинності. Утворення смогу Здоров'я: Негативний вплив на систему органів дихання людини
Оксиди сірки ($\text{SO}_x = \text{SO}_2 + \text{SO}_3$)	Побічний продукт згоряння всіх видів паливної біомаси, що містять сірку	Клімат і навколишнє середовище: Зворотний парниковий ефект через утворення аерозолів. Кислотні опади. Призводить до загибелі рослинності. Утворення смогу Здоров'я: Негативний вплив на систему органів дихання людини, викликають астму

Діючі нормативи [6] гранично допустимих викидів забруднюючих речовин для існуючих та нових джерел обмежують масову концентрацію забруднюючих речовин в організованих викидах. При цьому необхідно враховувати клас небезпеки кожної речовини, не перевищуючи встановлених значень нормативів гранично допустимих викидів для даного класу небезпеки (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3 — Коды, клас небезпечності, гранично допустимі концентрації, орієнтовні безпечні рівні діяннн та гранично допустимі викиди основних забруднюючих речовин [6]

Код	Речовина	Клас	ГДК, мг/м ³	Масова витрата, г/год	Гранично допустимі викиди, мг/м ³
301	Азоту оксиди NO _x	3	0,2	≥ 5000	500
330	Ангідрид сірчистий SO ₂	3	0,5	≥ 5000	500
337	Вуглецю оксид CO	4	5	≥ 5000	250
2902	Тверді частки, недиференційовані за складом	3	0,5	≤ 500	150
				> 500	50

Як видно з таблиці 1.3, гранично допустимі викиди встановлюються лише для тих котелень, масова витрата на яких перевищує нормативні значення, за виключенням викидів твердих часток, які завжди мають відповідати тим чи іншим гранично допустимим нормам.

Оксиди азоту (NO_x) утворюються переважно шляхом окислення азотовмісних сполук, наявних у паливі, а також внаслідок окислення атмосферного азоту в умовах високої температури в топці котла. Для зменшення їх кількості, в першу чергу, застосовують первинні методи, що пов'язані з належною підготовкою палива, зменшенням температури в камері згорання, оптимізацією коефіцієнта надлишку повітря, рециркуляцією продуктів згорання, вприскуванням води та багатоступеневою подачею повітря, з яких останній є найбільш поширеним

Наявність оксиду вуглецю (CO) в продуктах згорання вказує на неповне згорання палива в топці котла. Зменшення викидів оксиду вуглецю, як і інших продуктів хімічного недопалу біомаси (сажі, вуглеводневих сполук), також можливо здійснювати первинними методами, які зазвичай включають оптимізацію конструкції топки та режиму горіння. Розділення потоку дуттьового повітря на первинний та вторинний із подачею вторинного повітря в зону догорання палива, позонне регулювання кількості повітря, оптимізація розмірів колосникової решітки та способу подачі палива, його подрібнення, попереднє підсушування до вологості 15-20% і запобігання перевантаженню топки – все це дає можливість скоротити викиди продуктів хімічного недопалу біомаси. Зокрема, правильне налаштування подачі повітря з розподілом його вздовж решітки відповідно до розподілу палива дозволяє значно покращити ефективність згорання та знизити викиди оксиду вуглецю (CO) в котлах.

Для очистки продуктів згорання від твердих часток застосовують вторинні методи, які передбачають використання систем газоочистки, таких як циклони та мультициклони, скрубери, рукавні фільтри та електрофільтри.

Циклони являють собою механічні сепаратори, в яких у результаті дії відцентрової сили тверді частки відокремлюються від потоку димових газів внаслідок їх швидкого обертання в апараті. Серії циклонів, що працюють паралельно, об'єднують у мультициклони, що дозволяє зменшувати розміри апаратів та підвищувати ефективність очистки. Зокрема, якщо ефективність очистки для циклонів становить близько 65%, то для мультициклонів її значення може досягати 95%.

Основним недоліком циклонів та мультициклонів є незадовільний рівень очищення димових газів, зокрема для дрібних фракцій розміром менше 1 мкм. Для уловлювання та видалення цих часток ефективнішими є мокрі скрубери, в яких використовують водяну плівку, що стікає по стінках апарата та здатна зв'язувати дрібні фракції. Певним аналогом цієї технології є економайзери, які не лише здатні видаляти дрібні фракції з потоку димових газів, а й підвищувати ККД котла внаслідок повернення скидного тепла. Варто зауважити, що використання цих апаратів повинне супроводжуватись організацією зворотного водопостачання та очищення зворотної води від твердих часток. Крім енергетичного ефекту, економайзер також працює як мокрий скрубер, забезпечуючи вловлювання твердих часток із димових газів, які потрапляють у конденсат. В свою чергу, забруднений конденсат передається в систему очистки, де насамперед відбувається нейтралізація його рівня рН із наступною обробкою коагулянтном, що дозволяє зв'язати дрібні частки. Далі оброблений конденсат піддають флотації та очищенню в механічних фільтрах із подальшим скиданням в систему каналізації.

Досвід експлуатації рукавних фільтрів показує, що є ризик загоряння тканини від незгорілих частинок, які можуть попадати у фільтр. Незважаючи на можливість контролювати ризик займання, на великих котлах це майже не застосовується через відсутність штатних співробітників протягом усього часу експлуатації установки. Крім того, існує ризик забивання чи зношення фільтрувальної тканини, а тому ці апарати вимагають постійного контролю та обслуговування. Із вказаних вище причин тканинні фільтри не рекомендуються для використання в невеликих котлах на біомасі.

Альтернативою рукавних фільтрів є електрофільтри, у яких тверді частинки відділяються від потоку димових газів в електричному полі коронного розряду. Процес вилучення твердих частинок відбувається шляхом створення на поверхні частинки електричного заряду за допомогою коронуючого електрода з наступним її осадженням на заземленому електроді з протилежним зарядом.

Дані апарати газоочистки є надзвичайно ефективним (98-99,5%), причому їх ефективність майже так само висока для частинок розміром від 1 мкм та менше. За ступенем уловлювання електрофільтр відповідає кращим рукавним фільтрам, а його аеродинамічний опір є досить низьким порівняно з останніми. Суттєвими недоліками електрофільтрів є значні капітальні

витрати та складність експлуатації. Тому установка цих газоочисних систем є економічно доцільною для котлів на біомасі потужністю 5 МВт і більше.

Таким чином, влаштування системи газоочистки є складним та відповідальним інженерним заходом, що визначає екологічність та надійність роботи котельної установки. Вибір типу та характеристик системи газоочистки визначається на основі масової витрати димових газів ($\text{м}^3/\text{год}$) та початкової і кінцевої концентрації твердих часток ($\text{мг}/\text{м}^3$), що мають задовольняти значенням гранично допустимих викидів забруднюючих речовин в атмосферу.

Отже, економайзер підвищує екологічну ефективність роботи котельні, так як крім енергетичного ефекту, економайзер також працює як мокрий скруббер, забезпечуючи вловлювання твердих часток із димових газів, які потрапляють у конденсат.

1.3.2 Конденсат

Конденсат, що вприскується в димові гази в утилізаторі, складається з води з малою кількістю частинок пилу і органічних сполук від неповного згоряння. Присутній також невелика кількість мінеральних сполук і сполук важких металів, а також хлор і сірка з деревини.

Величина рН конденсату сильно змінюється в різних системах і залежить також від робочих параметрів. Типове значення складає рН 6-7, проте, були виміряні значення рН від 2.7 до значень перевищують 8. Частинки пилу, що містяться в конденсаті, сильно впливають на величину рН. Високі значення рН пов'язані з великим вмістом частинок, тобто летюча зола виявляється лужним середовищем, і більша її частина добре розчиняється в конденсаті. Нерозчинні частинки складають тільки 10%.

Конденсат повинен бути очищений перед зливом. Мінерали і важкі метали, що містяться в деревині, такі як кадмій, який абсорбується під час росту дерев в лісі, концентрується в конденсаті. Їх концентрація може досягти величин, що перевищують гранично допустимі значення для зливу. Дослідження показали, що велика кількість кадмію знаходиться в твердих частинках конденсату, а не в розчинній формі в воді конденсату. Частинки можуть бути видалені з рідини конденсату шляхом фільтрації, так що вміст кадмію знижується нижче допустимих значень для зливу. Після обробки і нейтралізації конденсат зазвичай зливається в каналізаційну систему.

1.4 Вартісна оцінка системи очистки продуктів згорання біомаси

Впровадження відповідних заходів та встановлення системи очистки димових газів призводять до зростання вартості як самого котла, так і котельні в цілому. Ціна котла визначається переважно заводом-виробником залежно від конструктивних особливостей, використаних матеріалів та оснащення. До складу ціни котла також входять первинні заходи зі зниження викидів забруднюючих речовин в атмосферу. Тому, як правило, дорожчі котли характеризуються кращими екологічними показниками.

Витрати на додаткові системи очистки визначаються в залежності від обсягу утворення димових газів та питомої вартості газоочисного обладнання. Обсяг утворення димових газів при спалюванні різних видів біомаси в умовах, що наближені до нормальних ($6\%-\text{O}_2$, $\alpha=1,4$), та температурі відхідних газів 200°C складає $3\text{--}3,5 \text{ м}^3/\text{год}/\text{кВт}$. Типова вартість газоочисного обладнання складає приблизно: 275 євро/тис. м^3 (діапазон 250–300 євро/тис. м^3) для циклонів; 550 євро/тис. м^3 (діапазон 500–600 євро/тис. м^3) для мультициклонів; 6 000 євро/тис. м^3 (діапазон 4000–7000 євро/тис. м^3) для рукавних фільтрів; 10 000 євро/тис. м^3 (діапазон 7000–12000 євро/тис. м^3) для електрофільтрів. При цьому залежно від обсягів утворення димових газів та потужності викиду (масової витрати забруднюючої речовини) можуть застосовуватись багатоступеневі газоочисні системи, в яких на першому ступені встановлюється циклон чи мультициклон, а на другому – більш ефективний пристрій (рукавний фільтр або електрофільтр).

В таблиці 1.4 наведені усереднені розрахунки обсягів викидів димових газів від котлів різної потужності, що працюють на деревній трісці. Для кожного діапазону потужностей котлів вказано рекомендоване газоочисне обладнання та виконана оцінка його вартості відносно діапазону цін котла, який визначений на основі збору та аналізу комерційних пропозицій.

Видно, що малі установки, масова витрата забруднюючих речовин від яких не перевищує нормативну, можуть бути оснащені відносно недорогими системами очистки, вартість яких становить не більше 10% від вартості котла. Однак для більш потужних установок зі значними масовими витратами димових газів, викиди забруднюючих речовин від яких повинні відповідати суворим гранично допустимим нормам, слід застосовувати комплексні та дорожчі системи очистки, вартість яких у середньому може сягати до 50% і більше від вартості котла.

Таблиця 1.4 — Рекомендоване газоочисне обладнання та середня вартість системи очистки димових газів для котелень на деревній трісці

Потужність котла, кВт	Обсяг утворення димових газів при $\alpha=1,4$, $T=200^{\circ}\text{C}$, тис. м ³ /год	Рекомендоване газоочисне обладнання	Вартість котла, тис. євро	Вартість системи очистки, тис. євро	Частка від вартості котла, %
500	1,6	циклон	9,4-22,1	0,4	2-4
1 000	3,3	мультициклон	19,7-170,5	1,8	1-9
1 500	4,9	мультициклон	27,0-330,0	2,7	1-10
2 000	6,5	мультициклон	30,2-376,0	3,6	1-12
4 000	13,0	економайзер	226,1-564,0	70,0	12-30
8 000	23,0	мультициклон+рукавний фільтр	584,5-891,0	12,6+138,0	17-25
10 000	32,5	мультициклон+електрофільтр	730,5-950,0	33,1+325,0	40-50

1.5 Постановка задачі та програма досліджень

Одними з найактуальніших завдань, що стоять перед державою останніми роками, є скорочення споживання дорогого імпортного палива – природного газу, а також збільшення частки використання відновлюваних джерел енергії. У зв'язку з вирівнюванням тарифів на природний газ та підняттям тарифів на теплову енергію економічна доцільність заміщення газу біомасою постійно зростає. Основною можливістю залучення біомаси в енергосектор, на сьогодні, полягають у її використанні у якості палива при виробництві теплової енергії для забезпечення потреб споживачів в опаленні та гарячому водопостачанні.

В Україні актуальним на сьогодні питанням – є розробка та впровадження енергозберігаючих теплотехнологій у секторі виробництва теплової енергії з біомаси, що дозволять знизити рівень енергоспоживання на одиницю національного валового продукту. Однією з таких теплотехнологій є утилізація теплоти димових газів за рахунок глибокого охолодження продуктів згорання.

В роботі передбачається проаналізувати роботу водогрійної опалювальної котельні, в якій встановлено водогрійний твердопаливний котел виробництва корпорації ІНКА (Харків), тепловою потужністю 5000 кВт та економайзер для глибинного охолодження димових газів групи компаній Enerstena (Литва), тепловою потужністю 1000 кВт.

Метою даної роботи є аналіз енергетичної і екологічної ефективності роботи біопаливної котельні в аеропорту “Бориспіль”.

Програма досліджень

1 Способи підвищення ефективності котелень на біопаливі (Літературний огляд).

- 2 Розрахунок параметрів димових газів
- 3 Тепловий розрахунок системи «котел-економізатор» та її елементів
- 4 Екологічний розрахунок системи «котел-економізатор» та її елементів
- 5 Експериментальні дослідження роботи біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль»
- 6 Математичне моделювання процесу теплообміну в економізаторі
- 7 Розробка стартап-проекту
- 8 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

2 ТЕПЛОВА СХЕМА БІОПАЛИВНОЇ КОТЕЛЬНОЇ АЕРОПОРТУ «БОРИСПІЛЬ»

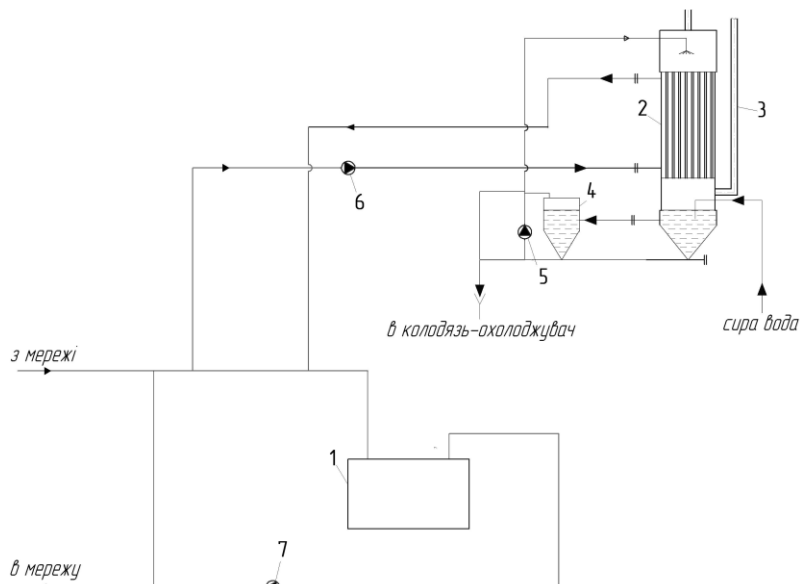
2.1 Опис теплової схеми

В даному розділі роботи передбачається описати роботу водогрійної опалювальної котельні зі встановленням водогрійного твердопаливного котла виробництва корпорації ІНКА (Харків), тепловою потужністю 5000 кВт та економайзер для глибинного охолодження димових газів групи компаній Enerstena (Литва), тепловою потужністю 1000 кВт.

Теплова схема біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль» наведена на рис. 2.2. Розширена теплова схема наведена у Додатку Г. Загальний вигляд біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль» та економайзера Enerstena СЕВ 1000 наведено на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 — Загальний вигляд біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль» та економайзера Enerstena СЕВ 1000



1 – твердопаливний водогрійний котел ПОЖ ІНКА 5000;

2 – економайзер Enerstena СЕВ 1000; 3 – димова труба; 4 – збірник конденсату;

5 – циркуляційний насос для конденсату; 6 – циркуляційний насос; 7 – група мережевих насосів

Рисунок 2.2 — Принципова теплова схема біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль»

Хімічно підготовлена знесолена вода (живильна) безперервно надходить в водогрійний котел. В котлі живильна вода нагрівається до температури 70-95 °C і відводиться через спільну теплову мережу на опалення, вентиляцію та на гаряче водопостачання. Необхідна для цього процесу тепла енергія виділяється при спалюванні палива (біомаси), яке подається в топку котла разом з необхідним для горіння повітрям. У котлі передбачена водяна система охолодження колосникової решітки. Вода, що охолоджує колосникову решітку, надходить для охолодження у водо-водяний теплообмінник та калорифер. Продукти згоряння, що утворились при спалюванні палива, надходять в економайзер, а після нього з відносно низькою температурою видаляються в атмосферу через димову трубу.

В результаті спалювання палива в шарі, на колосниковій перештовхувальній решітці, основна частка золи, близько 95%, залишається в топці й видаляється в зольний контейнер, що становлено під топкою котла. Інша частина золи виноситься з димовими газами. Очистка димових газів від золи здійснюється послідовно в мультициклоні шляхом інерційного очищення та в економайзері, шляхом осадження.

Для підвищення загального ККД твердопаливного котла та додаткової очистки димових газів даним проектом передбачена установка конденсатного економайзера Enerstena CEB 1000. Технічні характеристики економайзера Enerstena CEB 1000 наведені в табл. 2.1.

Даний економайзер складається з опорної рами, корпусу, та конденсатної системи. Опорна рама призначена для підтримання економайзера в вертикальному положенні та розподілення навантаження на фундамент. Корпус економайзера – вертикальна зварна конструкція круглого перетину з ввареними в неї теплообмінними трубками. В верхній частині корпусу є отвір для підводу димових газів Ду900мм. В нижній частині корпусу має отвір для відводу димових газів Ду700мм, а також в нижній частині корпусу є ємність для збору конденсату.

Конденсатна схема економайзера забезпечує подачу та розпилення конденсату в димових газах перед входом в теплообмінні трубки економайзера. Дане рішення дозволяє забезпечити максимальний відбір тепла з димових газів, а також очистити димові гази від залишків золи та смол що залишились після циклонів.

Далі конденсат стікає в нижню частину економайзера, проходить механічну очистку і за допомогою насоса знову подається в верхню частину економайзера. Конденсат циркулює по замкнутій схемі і його кількість постійно збільшується за рахунок конденсації димових газів. Надлишок конденсату скидається в систему каналізації після очистки та нейтралізації.

2.2 Розрахунок горіння дерев'яної тріски

2.2.1 Вихідні дані до розрахунку

– Склад палива – дерев'яної тріски – по робочій масі, представлений у таблиці 2.2.

Таблиця 2.1 — Вихідні дані до екологічного розрахунку – склад палива дерев'яної тріски

	H ^p	C ^p	S ^p	N ^p	O ^p	A ^p	W ^p
Склад палива, % (по робочій масі)	3,6	30,3	0	0,4	25,1	0,6	40
	100,0 %						

–Вміст O₂ в димових газах за котлом становить 6,5% .

2.2.2 Коефіцієнт надлишку повітря в димових газах на виході з котла – на вході в економайзер

$$\alpha^{\text{вих}} = \frac{21}{(21 - O_2 \cdot 100)}; \quad (2.1)$$

$$\alpha^{\text{вих}} = \frac{21}{(21 - 0,65 \cdot 100)} = 1,45.$$

2.2.3 Розрахунок повного згоряння тріски виконані за допомогою програмного забезпечення Excel. Результати розрахунків занесено до табл. 2.2.

Таблиця 2.2 — Розрахунок повного згоряння тріски

Розрахунок повного згоряння тріски										
Компонент	Палива, г в 100 г	Теплотехнологічна реакція	Повітря, кмоль/100кг палива			Продукти згоряння, кмоль/ 100кг палива				
			O ₂	N ₂	V _{B-XA}	RO ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O	V _{пр. зг}
C ^p	30,3	C+O ₂ =CO ₂	2,525	9,494	12,019	2,525	-	9,494	-	12,019
H ^p	3,6	H ₂ +0,5O ₂ =H ₂ O	0,9	3,384	4,284	0	-	3,384	1,8	5,184
O ^p	25,1	-	-0,784	-2,949	-3,733	0	-	-2,949	-	-2,949
N ^p	0,4	-	-	-	-	-	-	0,014	-	0,014
S ^p	0	S+O ₂ =SO ₂	0	0	0	0	-	0	-	0
A ^p	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W ^p	40	-	-	-	-	-	-	-	2,222	2,222
	100,0		A	Б	В	Г		Д	Е	Ж
		$\alpha = 1$ пов сух	2,641	9,929	12,569	2,525	0	9,943	4,022	16,490
ε'	0,156	$\alpha = 1$ пов вол	2,641	9,929	12,726	2,525	0	9,943	4,179	16,647
α	1,4	$\alpha = 1,4$ пов сух	3,697	13,900	17,816	2,525	1,056	13,915	4,022	21,518
ε''	0,219	$\alpha = 1,4$ пов вол	3,697	13,900	18,035	2,525	1,056	13,915	4,241	21,737

2.2.4 Визначення об'ємів повітря та димових газів ($\alpha=1,4$)

2.2.4.1 Теоретична кількість повітря, необхідного для спалювання палива

$$V_{\text{пов}}^o = \frac{(B + \varepsilon') \cdot 22,4}{100}; \quad (2.2)$$

$$V_{\text{пов}}^o = \frac{12,726 \cdot 22,4}{100} = 2,851 \text{ нм}^3/\text{кг палива.}$$

2.2.4.2 Дійсна кількість повітря, необхідного для спалювання палива

$$V_{\text{пов}}^{\alpha=1,4} = \frac{(\alpha \cdot B + \varepsilon'') \cdot 22,4}{100}; \quad (2.3)$$

$$V_{\text{пов}}^{\alpha=1,4} = \frac{18,035 \cdot 22,4}{100} = 4,04 \text{ нм}^3/\text{кг палива.}$$

2.2.4.3 Дійсна кількість продуктів згоряння палива (при $\alpha_2 = 1.4$)

- дійсний об'єм трьохатомних газів

$$V_{\text{RO}_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = \frac{I \cdot 22,4}{100}; \quad (2.4)$$

$$V_{\text{RO}_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = \frac{2,525 \cdot 22,4}{100} = 0,566 \text{ нм}^3/\text{кг палива.}$$

- дійсний об'єм азоту

$$V_{\text{N}_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = \frac{\alpha \cdot B - B + D}{100} \cdot 22,4; \quad (2.5)$$

$$V_{\text{N}_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = \frac{13,915 \cdot 22,4}{100} = 3,117 \text{ нм}^3/\text{кг палива.}$$

- дійсний об'єм водяної пари

$$V_{\text{H}_2\text{O пр.зг}}^{\alpha=1,4} = \frac{(E + \varepsilon'') \cdot 22,4}{100}; \quad (2.6)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O пр.зг}}^{\alpha=1,4} = \frac{4,241 \cdot 22,4}{100} = 0,95 \text{ нм}^3/\text{кг палива.}$$

- дійсний об'єм димових газів

$$V_{\text{пр.зг}}^{\alpha=1,4} = \frac{(3 + \varepsilon'') \cdot 22,4}{100}; \quad (2.7)$$

$$V_{\text{пр.зг}}^{\alpha=1,4} = \frac{21,737 \cdot 22,4}{100} = 4,869 \text{ нм}^3/\text{кг палива.}$$

- дійсний об'єм кисню

$$V_{\text{O}_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = \frac{(\alpha \cdot A - A) \cdot 22,4}{100}; \quad (2.8)$$

$$V_{\text{O}_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = \frac{1,056 \cdot 22,4}{100} = 0,237 \text{ нм}^3/\text{кг палива.}$$

2.2.4.4 Об'ємні частки продуктів згоряння (при $\alpha_2 = 1.4$)

$$r_{\text{H}_2\text{O пр.зг}}^{\alpha=1,4} = \frac{E + \varepsilon''}{3 + \varepsilon''}; \quad (2.9)$$

$$r_{\text{N}_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = \frac{\alpha \cdot B - B + D}{3 + \varepsilon''}; \quad (2.10)$$

$$r_{\text{O}_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = \frac{\alpha \cdot A - A}{3 + \varepsilon''}; \quad (2.11)$$

$$r_{RO_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = \frac{\Gamma}{3 + \epsilon}; \quad (2.12)$$

2.2.4.5 Парціальні тиски продуктів згоряння

$$P_{H_2O \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = P_{абс} \cdot r_{H_2O \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4}; \quad (2.13)$$

$$P_{H_2O \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = 101,3 \cdot 0,195 = 19,76 \text{ кПа.}$$

$$P_{N_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = P_{абс} \cdot r_{N_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4}; \quad (2.14)$$

$$P_{N_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = 101,3 \cdot 0,64 = 64,85 \text{ кПа.}$$

$$P_{O_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = P_{абс} \cdot r_{O_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4}; \quad (2.15)$$

$$P_{O_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = 101,3 \cdot 0,049 = 4,92 \text{ кПа.}$$

$$P_{RO_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = P_{абс} \cdot r_{RO_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4}; \quad (2.16)$$

$$P_{RO_2 \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = 101,3 \cdot 0,116 = 11,77 \text{ кПа.}$$

$$\sum_i P_{i \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = P_{абс}; \quad (2.17)$$

$$\sum_i P_{i \text{ пр.зг}}^{\alpha=1,4} = P_{абс} = 19,76 + 64,85 + 4,92 + 11,77 = 101,3 \text{ кПа.}$$

Розрахунки кількостей, об'ємних долей, парціальних тисків продуктів згоряння повного згоряння тріски виконані за допомогою програмного забезпечення Excel. Результати розрахунків занесено до табл. 2.3.

Таблиця 2.3 — Результати розрахунків повного згоряння тріски

Показник	Позначення	Значення величини	Одиниці вимірювання
Теоретична кількість продуктів згоряння (при $a=1$)	V_B^o	2,851	нм ³ повітря/кг палива
	$V_{пс.RO_2}^o$	0,566	нм ³ RO ₂ /кг палива
	$V_{пс.N_2}^o$	2,23	нм ³ N ₂ /кг палива
	$V_{пс.H_2O}^o$	0,9	нм ³ H ₂ O/кг палива
	$V_{пс}^o$	3,69	нм ³ пр. згор./кг палива
Дійсна кількість продуктів згоряння (при $a=1,4$)	V_B^d	4,04	нм ³ повітря/кг палива
	$V_{RO_2}^d$	0,566	нм ³ RO ₂ /кг палива
	$V_{N_2}^d$	3,117	нм ³ N ₂ /кг палива
	$V_{O_2}^d$	0,237	нм ³ O ₂ /кг палива
	$V_{H_2O}^d$	0,95	нм ³ H ₂ O/кг палива
	V^d	4,869	нм ³ пр. згор./кг палива
Об'ємні долі продуктів згоряння (при $a=1,4$)	$r_{RO_2}^d$	0,12	нм ³ RO ₂ /кг пр. згор.
	$r_{N_2}^d$	0,64	нм ³ N ₂ /кг пр. згор.
	$r_{O_2}^d$	0,05	нм ³ O ₂ /кг пр. згор.
	$r_{H_2O}^d$	0,19	нм ³ H ₂ O/кг пр. згор.
	$\sum r_i$	1,00	нм ³ пр. згор./ нм ³ пр. згор.
Парціальні тиски продуктів згоряння	$P_{RO_2}^d$	11,77	кПа
	$P_{N_2}^d$	64,85	кПа
	$P_{O_2}^d$	4,92	кПа
	$P_{H_2O}^d$	19,76	кПа
	$\sum P_i$	101,3	кПа

2.2.5 Розрахунок нижчої та вищої теплоти згоряння дерев'яної тріски

У економайзері продукти згоряння охолоджуються до температури, яка нижче температури роси ($t_{\text{вих}} < t_p$). При цьому наявною теплотою є не нижча теплота згоряння палива $Q_{\text{н}}^p$, а вища $Q_{\text{в}}^p$ – кількість теплоти, яка виділяється при згорянні палива, коли продукти згоряння охолоджуються до початкової температури, при якій підводиться в топку паливо і повітря ($t_m = t_n = t_o$), а вся пара, що утворюється при згорянні палива, повністю конденсується. Різниця між $Q_{\text{н}}^p$ і $Q_{\text{в}}^p$ полягає в тому, що вища теплота згоряння палива визначається, коли вся вода, що знаходиться у газоподібному стані, конденсується, тоді як при визначенні $Q_{\text{н}}^p$ вся вода знаходиться у вигляді пари.

2.2.5.1 Нижчу теплоту згоряння палива розраховуємо по формулі Менделєєва

$$Q_{\text{н}}^p = (0,339 \cdot C^p + 1,03 \cdot H^p - 0,109 \cdot (O^p - S^p) - 0,025 \cdot W^p). \quad (2.18)$$

2.2.5.2 Вищу теплоту згоряння палива розраховуємо по формулі

$$Q_{\text{в}}^p = Q_{\text{н}}^p + 6 \cdot (W^p + 9 \cdot H^p). \quad (2.19)$$

2.2.5.3 Теплоти згоряння $Q_{\text{н}}^p$ і $Q_{\text{в}}^p$ є енергетичними характеристиками палива і показують скільки енергії у вигляді теплоти можна одержати при повному згорянні палива. Для знаходження $Q_{\text{н}}^p$ за відомою теплотою $Q_{\text{в}}^p$ необхідно із $Q_{\text{в}}^p$ відняти теплоту конденсації всієї пари, яка утворюється при спалюванні палива

$$Q_{\text{в}}^p - Q_{\text{конд}}^{\text{повн}} = Q_{\text{н}}^p. \quad (2.20)$$

Ця різниця залежить від виду палива. Для дерев'яної тріски (при вологості палива $W=40\%$) відношення

$$\frac{Q_{\text{в}}^p}{Q_{\text{н}}^p} = \frac{12,04}{10,22} = 1,178 \text{ або } \frac{Q_{\text{в}}^p}{Q_{\text{н}}^p} = \frac{12,04}{10,22} = 117,8 \, \%.$$

2.2.5.4 Звідси енергія, що виділяється при повній конденсації водяної пари, складає додаткові 17,8% від $Q_{\text{н}}^p$

$$\frac{Q_{\text{конд}}^{\text{повн}}}{Q_{\text{н}}^p} = 0,178 \text{ або } \frac{Q_{\text{конд}}^{\text{повн}}}{Q_{\text{н}}^p} = 17,8 \, \%.$$

Значення теплоти конденсації всієї водяної пари, що утворюється при згоранні одиниці палива $Q_{\text{конд}}^{\text{повн}}$ розраховано для різної вологості дерев'яної тріски. Результати розрахунків наведено в таблиці 2.4 та на рис. 2.3, 2.4. На основі отриманих даних, побудовані графіки: залежність теплоти нижчої згоряння тріски від вологості палива (рис. 2.3), теоретично-максимальне підвищення ККД системи “котел-економайзер” по відношенню до ККД котла (без теплових втрат в економайзері) (рис. 2.4).

Таблиця 2.4 — Розрахунок нижчої та вищої теплоти згоряння дерев'яної тріски та теплоти конденсації всієї водяної пари, що утворюється при згоряння одиниці палива (Q_k повн) для тріски з різною вологістю палива.

Елементарний склад палива							Q_n^p	Q_b^p	Q_k повн (додатк до Q_n^p)	Q_k повн (додатк до Q_b^p)	ККД максимальний за Q_n^p
W^p	S^p	H^p	O^p	%	N^p	C^p	МДж/кг	МДж/кг	%	%	%
0	0,00	6,00	41,83	1,00	0,67	50,50	18,7081	20,06	7,3	6,8	107,3
5	0,00	5,70	39,74	0,95	0,63	47,98	17,6471	19,06	8,0	7,4	108,0
10	0,00	5,40	37,65	0,90	0,60	45,45	16,5861	18,06	8,9	8,2	108,9
15	0,00	5,10	35,56	0,85	0,57	42,93	15,5251	17,06	9,9	9,0	109,9
20	0,00	4,80	33,47	0,80	0,53	40,40	14,4641	16,05	11,0	9,9	111,0
25	0,00	4,50	31,38	0,75	0,50	37,88	13,4031	15,05	12,3	10,9	112,3
30	0,00	4,20	29,28	0,70	0,47	35,35	12,342	14,05	13,8	12,1	113,8
35	0,00	3,90	27,19	0,65	0,43	32,83	11,281	13,04	15,6	13,5	115,6
40	0	3,6	25,1	0,6	0,4	30,3	10,22	12,04	17,8	15,1	117,8
45	0,00	3,30	23,01	0,55	0,37	27,78	9,16	11,04	20,5	17,0	120,5
50	0,00	3,00	20,92	0,50	0,33	25,25	8,10	10,03	23,9	19,3	123,9
55	0,00	2,70	18,83	0,45	0,30	22,73	7,04	9,03	28,3	22,1	128,3
60	0,00	2,40	16,73	0,40	0,27	20,20	5,98	8,03	34,3	25,5	134,3
65	0,00	2,10	14,64	0,35	0,23	17,68	4,91	7,02	42,9	30,0	142,9
70	0,00	1,80	12,55	0,30	0,20	15,15	3,85	6,02	56,2	36,0	156,2

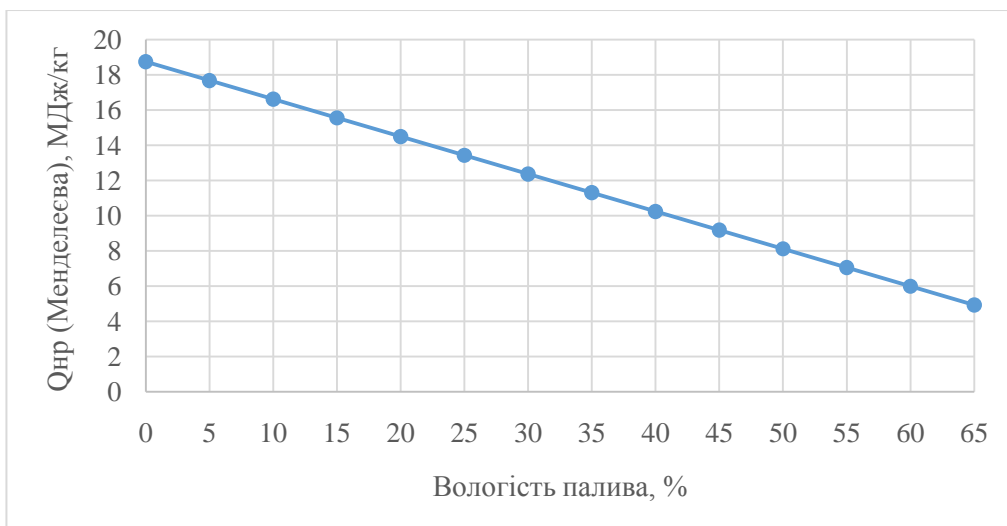


Рисунок 2.3 — Залежність теплоти нижчої згоряння тріски від вологості палива

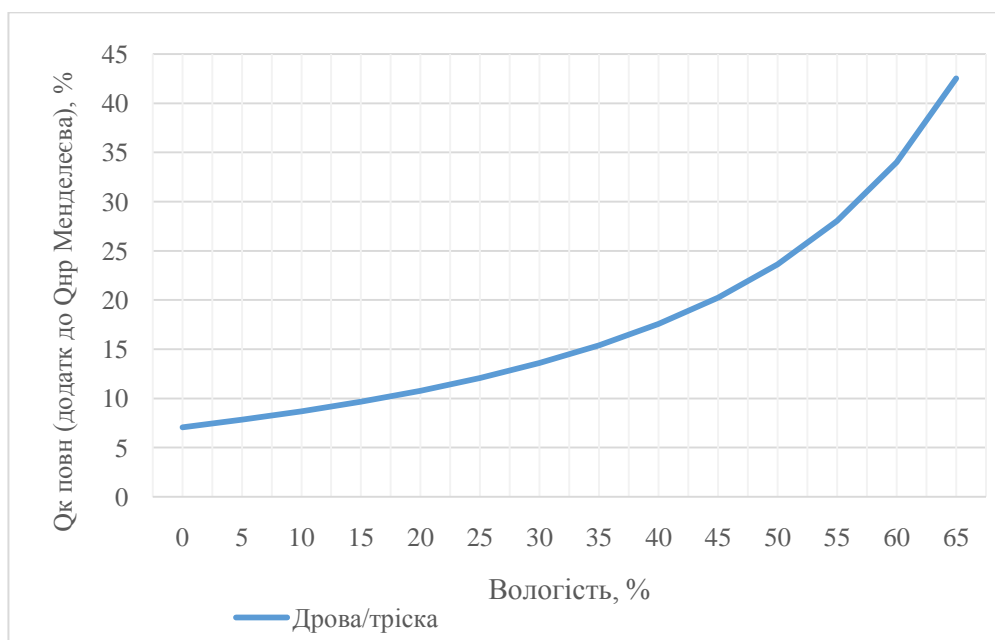


Рисунок 2.4 — Теоретично-максимальне підвищення ККД системи «котел-економізатор» по відношенню до ККД котла (без теплових втрат в економізаторі)

На основі отриманих даних можна зробити наступні висновки:

–встановлено, що при збільшенні вологості палива на 10% (від 30% до 40%), теплота нижча згоряння тріски знижується на 2 МДж/кг (від 12 МДж/кг до 10 МДж/кг). Отже, теплота нижча згоряння тріски зменшується пропорційно до збільшення вологості палива;

–встановлено, що при збільшенні вологості палива на 10% (від 30% до 40%), теоретично-максимальне підвищення ККД системи «котел-економізатор» по відношенню до ККД котла (без теплових втрат в економізаторі), збільшується на 4% (від 13,8% до 17,8%). Отже, теоретично-

максимальне підвищення ККД системи “котел-економізатор” по відношенню до ККД котла (без теплових втрат в економізаторі), збільшується пропорційно до збільшення вологості палива.

2.3 Визначення параметрів димових газів на виході з котлів – вході в економізатор

2.3.1 Вихідні дані до розрахунку

1) Для водогрійного котла типу ПОЖ ІНКА 5000 температура димових газів перед економізатором t'_Γ і витрата тріски (при вологості тріски $W=40\%$)

$$t'_\Gamma = 100 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$B = 2044 \text{ кг/год.}$$

2) За результатами розрахунків повного згоряння твердого палива – тріски, при $\alpha = 1$, повітря сухе з табл. 2.3 теоретичний об'єм повітря для спалювання 1 кг тріски $V_{\text{пов}}^o = 2,85 \text{ м}^3/\text{кг}$; теоретичний об'єм трьохатомних газів $V_{\text{RO}_2}^o = 0,57 \text{ м}^3/\text{кг}$; теоретичний об'єм азоту $V_{\text{N}_2}^o = 2,23 \text{ м}^3/\text{кг}$; теоретичний об'єм водяної пари $V_{\text{H}_2\text{O}}^o = 0,90 \text{ м}^3/\text{кг}$; теоретичний об'єм димових газів $V_\Gamma^o = 3,69 \text{ м}^3/\text{кг}$.

3) Коефіцієнт надлишку повітря за котлами $\alpha_{\text{вих}} = 1,45$.

4) Вологовміст повітря $d_{\text{п}} = 0,01 \text{ кг/кг}$.

2.3.2 Визначення параметрів димових газів на вході в калорифер

2.3.2.1 Дійсний об'єм водяної пари в димових газах

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{д}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^o + 1,6 \cdot \alpha_{\text{вих}} \cdot (d_{\text{пов}} - 0,01) + 0,0161 \cdot (\alpha_{\text{вих}} - 1) \cdot V_{\text{пов}}^o, \quad (2.21)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{д}} = 0,90 + 1,6 \cdot 1,4 \cdot (0,01 - 0,01) + 0,0161 \cdot (1,4 - 1) \cdot 2,85 = 0,92 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2.3.2.2 Об'єм сухих димових газів

$$V_{\text{с.г}}^{\text{BX}} = V_{\text{RO}_2}^o + V_{\text{N}_2}^o + (\alpha_{\text{вих}} - 1) \cdot V_{\text{пов}}^o, \quad (2.22)$$

$$V_{\text{с.г}}^{\text{BX}} = 0,57 + 2,23 + (1,5 - 1) \cdot 2,85 = 3,14 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2.3.2.3 Дійсний об'єм димових газів

$$V_\Gamma^{\text{BX}} = V_{\text{RO}_2}^o + V_{\text{N}_2}^o + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{д}} + (\alpha_{\text{вих}} - 1) \cdot V_{\text{пов}}^o, \quad (2.23)$$

$$V_\Gamma^{\text{BX}} = 0,57 + 2,23 + 0,92 + (1,4 - 1) \cdot 2,85 = 4,06 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2.3.2.4 Визначаємо масу сухих димових газів

$$G_\Gamma^{\text{с}} = V_{\text{RO}_2}^o \cdot \rho_{\text{RO}_2}^o + V_{\text{N}_2}^o \cdot \rho_{\text{N}_2}^o + V_{\text{пов}}^o \cdot \rho_{\text{с.пов}}^o \cdot (\alpha_{\text{вих}} - 1), \quad (2.24)$$

$$G_\Gamma^{\text{с}} = 0,566 \cdot 1,96 + 2,23 \cdot 1,25 + 2,85 \cdot 1,293 \cdot (1,4 - 1) = 5,37 \text{ кг/кг}.$$

2.3.2.5 Вологовміст димових газів на виході із котла (на вході в економізатор)

$$d_{\Gamma}^{\text{BX}} = \frac{V_{H_2O} \rho_{H_2O}}{G_{\Gamma}^c}, \quad (2.25)$$

$$d_{\Gamma}^{\text{BX}} = \frac{0,92 \cdot 0,804}{5,37} = 0,138 \text{ кг/кг с.г.}$$

2.3.2.6 Масова витрата сухих димових газів за водоگрійним котлом

$$L_{\Gamma}^c = \frac{B_{\kappa}}{3600} \cdot G_{\Gamma}^c, \quad (2.26)$$

$$L_{\Gamma(\text{BK})}^c = \frac{2044}{3600} \cdot 5,37 = 3,05 \text{ кг/с;}$$

2.3.2.7 Густина сухих димових газів на вході в економайзер

$$\rho_{\text{с.г}}^{\text{BX}} = \frac{V_{RO_2} \cdot \rho_{CO_2} + V_{N_2}^o \cdot \rho_{N_2} + (\alpha_{\text{BX}} - 1) V_o \cdot \rho_{\text{с.пов}}}{V_{\text{с.г}}^{\text{BX}}}, \quad (2.27)$$

де ρ_{CO_2} , ρ_{N_2} , $\rho_{\text{с.пов}}$ – густини вуглекислого газу, азоту, сухого повітря при нормальних умовах, які відповідно складають значення

$$\rho_{CO_2} = 1,964 \text{ кг/м}^3, \rho_{N_2} = 1,257 \text{ кг/м}^3, \rho_{\text{с.пов}} = 1,293 \text{ кг/м}^3,$$

$$\rho_{\text{с.г}}^{\text{BX}} = \frac{0,566 \cdot 1,964 + 2,23 \cdot 1,257 + (1,5 - 1) \cdot 2,851 \cdot 1,293}{3,14} = 1,83 \text{ кг/м}^3.$$

2.3.2.8 Вологовміст димових газів на виході із економайзера при 100% відносній вологості та температурі $\vartheta_{y_{x_2}} = 41^\circ \text{C}$

$$d_{yx} = \frac{M_{\Pi}}{M_{\text{с.г}}^{\text{BX}}} \cdot \frac{p_{\Pi}^{yx}}{p - p_{\Pi}^{yx}}, \quad (2.28)$$

де M_{Π} – молекулярна маса водяної пари при нормальних умовах, г/моль

$M_{\text{с.г}}^{\text{BX}}$ – молекулярна маса вихідних сухих газів

$$M_{\text{с.г}}^{\text{BX}} = M_{CO_2} \cdot r_{CO_2}^{\text{вих}} + M_{N_2} \cdot r_{N_2}^{\text{вих}} + M_{\text{пов}} \cdot r_{\text{пов}}^{\text{вих}}, \quad (2.29)$$

$$M_{CO_2} = 12 + 16 \cdot 2 = 44 \text{ г/моль; } M_{N_2} = 14 \text{ г/моль; } M_{\text{пов}} = 28,96 \text{ г/моль.}$$

де $r_{CO_2}^{\text{вих}}$, $r_{N_2}^{\text{вих}}$, $r_{\text{пов}}^{\text{вих}}$ – долі компонентів сухих газів, що знаходяться за наступним формулам

$$r_{RO_2}^{\text{вих}} = \frac{V_{RO_2}}{V_{\text{с.г}}^{\text{вих}}}, \quad r_{N_2}^{\text{вих}} = \frac{V_{N_2}}{V_{\text{с.г}}^{\text{вих}}}, \quad r_{\text{пов}}^{\text{вих}} = \frac{(\alpha_{\text{вих}} - 1) \cdot V_o}{V_{\text{с.г}}^{\text{вих}}}, \quad (2.30)$$

де $V_{\text{с.г}}^{\text{вих}}$ – об'єм сухих димових газів, що знаходиться за формулою

$$V_{\text{с.г}}^{\text{вих}} = V_{RO_2} + V_{o \text{ } N_2} + (\alpha_{\text{вих}} - 1) \cdot V_o; \quad (2.31)$$

$$V_{\text{с.г}}^{\text{вих}} = 0,57 + 2,23 + (1,5 - 1) \cdot 2,85 = 3,14 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Тоді,

$$r_{RO_2}^{вих} = \frac{0,57}{3,14} = 0,182, \quad r_{N_2}^{вих} = \frac{3,117}{3,14} = 0,99, \quad r_{пов}^{вих} = \frac{(1,5-1) \cdot 2,85}{3,14} = 0,45,$$

Тоді,

$$M_{с.г}^{вих} = 44 \cdot 0,182 + 14 \cdot 0,99 + 28,96 \cdot 0,45 = 34,9 \text{ г/моль.}$$

2.3.2.9 Парціальний тиск водяної пари визначається за формулою наведеною в [7]

$$p_{п} = 0,13332 \cdot 10^N, \quad (2.32)$$

де N – показник, що враховує вплив температури

$$N = (8,12 \cdot t_s + 156) / (t_s + 236).$$

Для $\vartheta_{yx_2} = 41^\circ \text{C}$ $N = (8,12 \cdot 50 + 156) / (50 + 236) = 1,765$.

$$p_{п} = 0,13332 \cdot 10^{1,765} = 7,761 \text{ кПа.}$$

2.3.2.10 Тоді, вологовміст димових газів на виході із економайзера при 100% відносній вологості та температурі $\vartheta_{yx_2} = 41^\circ \text{C}$ за формулою (2.9)

$$d_{yx} = \frac{0,92 \cdot 0,804}{3,14 \cdot 1,83} = 0,129.$$

2.3.2.11 Густина сухих димових газів на виході з економайзера

$$\rho_{с.г}^{вих} = \frac{V_{RO_2} \cdot \rho_{CO_2} + V_{N_2}^o \cdot \rho_{N_2} + (\alpha_{вх} - 1)V_0 \cdot \rho_{с.пов}}{V_{с.г}^{вих}},$$

де $\rho_{CO_2}, \rho_{N_2}, \rho_{с.пов}$ – густини вуглекислого газу, азоту, сухого повітря при нормальних умовах.

$$\rho_{с.г}^{вих} = \frac{0,566 \cdot 1,964 + 2,23 \cdot 1,257 + (1,5 - 1) \cdot 2,851 \cdot 1,293}{3,14} = 1,83 \text{ кг/м}^3.$$

2.3.2.12 Визначаємо теплоємність сухих продуктів згоряння. В першому наближенні для $\rho_{с.г}$, можна взяти значення питомої масової теплоємності $\rho_{с.пов}$ сухого повітря при $t_{сг} = 78^\circ \text{C}$, кДж/(кг·К)

$$C_{с.пов} = \frac{\mu \cdot C_p}{\mu}, \quad (2.33)$$

де μ – молекулярна маса повітря, кмоль/кг.

$$\mu \cdot C_p = 28,7558 + 0,0057208 \cdot t_{сг} = 28,7558 + 0,0057208 \cdot 78 = 29,2 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)},$$

$$C_{с.пов} = \frac{\mu \cdot C_p}{\mu} = \frac{29,2}{28,97} = 1,008 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$$

2.5 Розрахунок температури точки роси димових газів на вході в економайзер

Основна задача конденсаційної техніки – охолодити продукти згоряння нижче температури точки роси і відібрати теплоту конденсації водяної пари для використання її в корисних цілях.

При охолодженні димових газів нижче температури температури точки роси, водяні пари, що знаходяться у димових газах починають конденсуватися. Чим більше димові гази охолоджуються, тим більша кількість води конденсується, і кількість додаткового тепла, що повертається в систему «котел-економізатор» збільшується. рис. 2.5 показує збільшення вироблення тепла в процентах, яке може бути досягнуто шляхом зниження температури димових газів. Графік побудовано для температури димових газів – 130 °C і концентрації CO₂ в димових газах – 12%. Різні криві на малюнку відповідають різним значенням вологості деревної тріски.

Криві показують теоретичне підвищення ККД системи «котел-економізатор» по відношенню ККД котла, в залежності від вологості палива і температури димових газів. Досвід експлуатації діючих систем конденсації підтверджує теоретичні висновки.

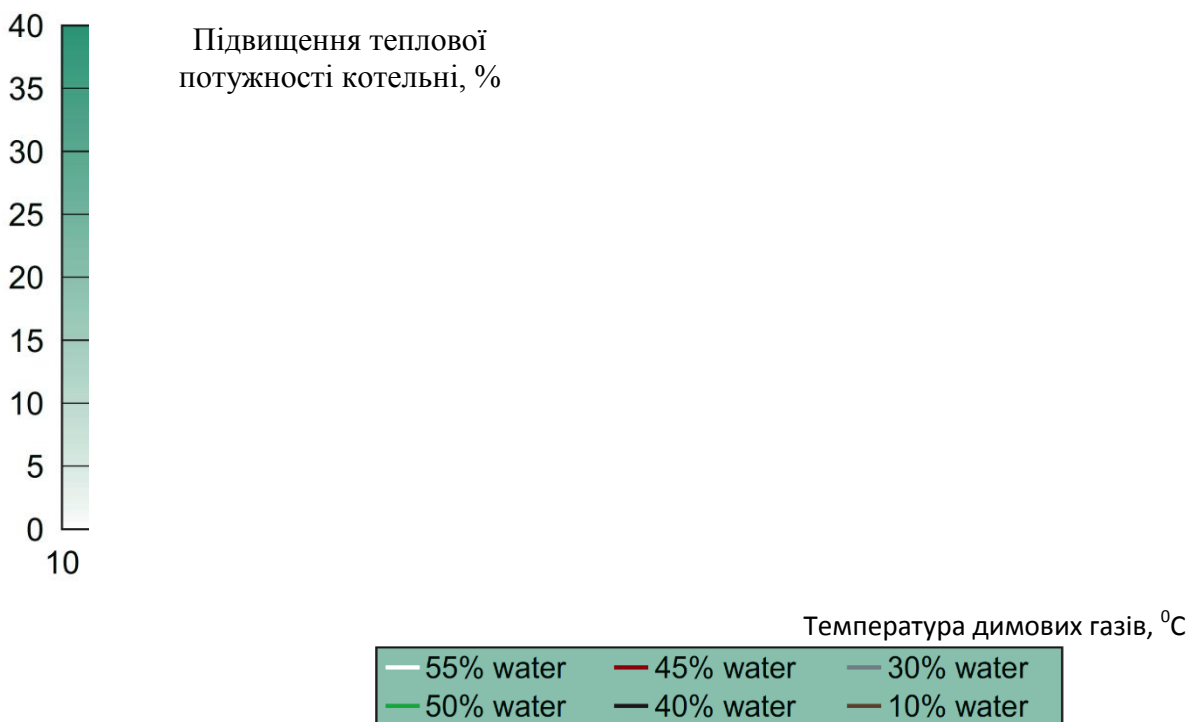


Рисунок 2.5 — Залежність приросту теплової потужності за рахунок охолодження димових газів для різних значень вологості деревної тріски

2.5.1 Згідно до [8] при коеф. надлишку повітря $\alpha_{\text{вдх}} = 1,4$

$$t_p = 117,5 \cdot \alpha_{\text{вдх}}^{-0,155} - 57,09, \quad (2.34)$$

$$t_p = 117,5 \cdot 1,4^{-0,155} - 57,09 = 54,43^\circ\text{C}.$$

2.5.2 Згідно до [7] при коеф. надлишку повітря $\alpha_{\text{вдх}} = 1,4$ і вологовмісту димових газів на вході в економізатор $d = 138 \text{ г/кг с.г.}$

$$t_p = 37,1 \cdot \lg \left[d / (3,77 + 0,085 \cdot \alpha_{\text{вдх}}) \right], \quad (2.35)$$

$$t_p = 37,1 \cdot \lg 138 / (3,77 + 0,085 \cdot 1,4) = 57,5^\circ\text{C}.$$

2.5.3 Згідно до [9] при вологовмісті димових газів на вході в економайзер $d = 138 \text{ г/кг с.г.}$

$$t_p = 37,6 \cdot \lg 250 \cdot x_c, \quad (2.36)$$

$$t_p = 37,6 \cdot \lg 250 \cdot 138 = 57,82 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2.5.4 Згідно [10] температуру точки роси визначаємо методом послідовних ітерацій з використанням залежності $p_s = f(t_s)$, оскільки отримання аналітичної залежності температури насичення від парціального тиску водяного пара на лінії насичення $t_s = f(p_s)$ загальними методами математики складно.

2.5.4.1 Вихідні дані

- парціальний тиск водяної пари у продуктах згоряння $P_{H_2O \text{ пр.г}}^{\alpha=1.4} = 19,76 \text{ кПа}.$

2.5.4.2 Перша ітерація

а) Приймаємо початкові значення температур в околі можливого значення точки роси

$$t_m = 50 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_b = 50 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

б) За допомогою формули Фільня [11]

$$p_s = 0,13332 \cdot 10^N, \quad (2.37)$$

$$\text{де } N = (8,12 \cdot t_s + 156) / (t_s + 236). \quad (2.38)$$

в) Для $t_m = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$N = (8,12 \cdot 50 + 156) / (50 + 236) = 1,965.$$

$$p_{II}^M = 0,13332 \cdot 10^{1,965} = 12,3007 \text{ кПа}.$$

Для $t_b = 58 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$N = (8,12 \cdot 58 + 156) / (58 + 236) = 2,133$$

$$p_{II}^B = 0,13332 \cdot 10^{2,133} = 18,089 \text{ кПа}.$$

г) Інтерполюючи знаходимо орієнтовне значення температури точки роси

$$t_p = t_m + (p_{II}^{BX} - p_{II}^M) \cdot (t_b - t_m) / (p_{II}^B - p_{II}^M), \quad (2.39)$$

$$t_p = 50 + (19,76 - 12,3007) \cdot (58 - 50) / (19,765 - 12,3007) = 60,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2.5.4.3 Друга ітерація

а) Задаємось новими значеннями $t_{m1} = t_p - 0,5 = 59,8 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t_{b1} = t_p + 0,5 = 60,8 \text{ } ^\circ\text{C}$

б) Для $t_{m1} = 59,8 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$N = (8,12 \cdot 59,8 + 156) / (59,8 + 236) = 2,169$$

$$p_{\pi}^{m1} = 0,13332 \cdot 10^{2,163} = 19,672 \text{ кПа.}$$

Для $t_{61} = 60,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$N = (8,12 \cdot 60,8 + 156) / (60,8 + 236) = 2,189$$

$$p_{\pi}^{61} = 0,13332 \cdot 10^{2,183} = 20,602 \text{ кПа.}$$

в) За формулою (2.19)

$$t_p = 59,8 + (19,7647 - 19,672) \cdot (60,8 - 59,8) / (20,602 - 19,672) = 59,9 \text{ }^{\circ}\text{C} \approx 60 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Розрахунок закінчено. Значення температури точки роси

$$t_p = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Такі значення температур точки роси співставляються з літературними джерелами. Отже, вважатимемо розрахунок закінченим.

2.6 Висновки до розділу 2

На основі результатів розрахунку параметрів димових газів біопаливної котельні аеропорту “Бориспіль” можна зробити наступні висновки:

— встановлено, що при збільшенні вологості палива на 10% (від 30% до 40%), теплота нижча згоряння тріски знижується на 2 МДж/кг (від 12 МДж/кг до 10 МДж/кг). Отже, теплота нижча згоряння тріски зменшується пропорційно до збільшення вологості палива;

— встановлено, що при збільшенні вологості палива на 10% (від 30% до 40%), теоретично-максимальне підвищення ККД системи “котел-економізатор” по відношенню до ККД котла (без теплових втрат в економізаторі), збільшується на 4% (від 13,8% до 17,8%). Отже, теоретично-максимальне підвищення ККД системи “котел-економізатор” по відношенню до ККД котла (без теплових втрат в економізаторі), збільшується пропорційно до збільшення вологості палива;

— визначено параметри димових газів на вході та виході з економізатора;

— температури точки роси димових газів при вологості палива 40% складає 60 $^{\circ}\text{C}$.

3 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ «КОТЕЛ-ЕКОНОМАЙЗЕР» ТА ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1 Методика розрахунків теплового балансу системи «котел-економізатор» та її елементів

3.1.1 Методика розрахунку теплового балансу котла ПОЖ ІНКА 5000

Тепловий баланс на 1 кг твердого палива при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $101,3\text{ кПа}$ згідно з [12]

$$Q_b^p = Q_1 + Q_2 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (3.1)$$

де Q_b^p – наявна теплота – кількість теплоти, яка виділяється при згорянні палива, коли продукти згорання охолоджуються до початкової температури, при якій підводиться в топку паливо і повітря ($t_m = t_n = t_o$), а вся пара, що утворюється при згорянні палива, повністю конденсується.

Q_1 – теплота, що корисно використовується в системі: на нагрів мережевої води в водогрійному котлі та на підігрів зворотньої мережевої води перед котлом;

Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6 – втрати теплоти: з димовими газами, від хімічного, механічного недопалу, від зовнішнього охолодження котлів та економізатора, з фізичним теплом шлаків відповідно.

Рівняння (3.1) можна представити у вигляді

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100\%, \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \text{де } q_1 &= 100 \cdot Q_1 / Q_b^p, & q_2 &= 100 \cdot Q_2 / Q_b^p, & q_3 &= 100 \cdot Q_3 / Q_b^p, \\ q_4 &= 100 \cdot Q_4 / Q_b^p, & q_5 &= 100 \cdot Q_5 / Q_b^p, & q_6 &= 100 \cdot Q_6 / Q_b^p. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Враховуючи те, що розрахунок теплового балансу котла традиційно в нашій країні розраховують за нижчою теплотою згорання палива, в системі «котел-економізатор» при охолодженні димових газів нижче температури точки роси виникає необхідність перерахунку теплового балансу за вищою теплотою згорання палива.

Втрата теплоти з відхідними газами в котлі, розрахована за вищою теплотою згорання, згідно [13]:

– по вищій теплоті згорання

$$q_{2к}^b = \frac{[I_{\Gamma} - (\alpha_{\text{ух}}^k - \beta') \cdot I_{0 \text{ х.пов}} + \Delta Q_{\text{конд}}^k] \cdot (100 - q_4^b)}{Q_b^p}, \quad (3.4)$$

де I_{Γ} – ентальпія димових газів на вході в економізатор при температурі димових газів на вході в економізатор t'_{Γ} . Ентальпія продуктів згорання палива при $\alpha > 1$

$$I = I_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1) \cdot I_{\text{пов}}^0, \quad (3.5)$$

де I_{Γ}^0 – ентальпія газів при $\alpha = 1$ та температурі ϑ , що визначається за наступною формулою

$$I_G^o = V_{RO_2}(c\mathcal{G})_{CO_2} + V_{N_2}^o(c\mathcal{G})_{N_2} + V_{H_2O}^o(c\mathcal{G})_{H_2O}; \quad (3.6)$$

$I_{\text{пов}}^0$ – ентальпія теоретично необхідної кількості повітря при температурі \mathcal{G} , що визначається за наступною формулою

$$I_{\text{пов}}^0 = V_o(c\mathcal{G})_{\text{пов}}. \quad (3.7)$$

$\alpha_{\text{ух}}^k$ – коефіцієнт надлишку повітря у димових газах на вході в економайзер

β' – відношення кількості повітря на вході до повітряного тракту до теоретично необхідної кількості

$$\beta' = \alpha_T - \Delta\alpha_T; \quad (3.8)$$

$I_{0 \text{ х.пов}}$ – ентальпія теоретично необхідної кількості холодного повітря на вході до повітряного тракту при температурі $t_{0 \text{ х.пов}}$;

$\Delta Q_{\text{конд}}^k$ – кількість теплоти, що виноситься з водяними парами, що входять в склад димових газів, в навколишнє середовище

$$\Delta Q_{\text{конд}}^k = \varphi \cdot (Q_{\text{в}}^p - Q_{\text{н}}^p) \cdot 10^3, \quad (3.9)$$

де φ – коефіцієнт збереження тепла.

Втрата теплоти з відхідними газами в котлі, розрахована за нижчою теплотою згорання,

$$q_{2\kappa}^{\text{н}} = \frac{(I_{\text{г}} - \alpha_{\text{ух}}^k \cdot I_{0 \text{ х.пов}}) \cdot (100 - q_4^{\text{н}})}{Q_{\text{н}}^p}, \quad (3.10)$$

Перерахунок $q_{2\kappa}^{\text{н}}$ на $q_{2\kappa}^{\text{в}}$

$$q_{2\kappa}^{\text{в}} = [q_{2\kappa}^{\text{н}} + (\frac{Q_{\text{в}}^p}{Q_{\text{н}}^p} - 1) \cdot 100] \cdot \frac{Q_{\text{н}}^p}{Q_{\text{в}}^p}. \quad (3.11)$$

Перерахунок втрат теплоти q_3, q_4, q_5, q_6 розрахованих за нижчою теплотою згорання $Q_{\text{н}}^p$ на значення розраховані за вищою теплотою згорання $Q_{\text{в}}^p$

$$q_i^{\text{в}} = q_i^{\text{н}} \cdot \frac{Q_{\text{н}}^p}{Q_{\text{в}}^p}. \quad (3.12)$$

ККД котла

– розрахований за нижчою теплотою згорання палива

$$\eta_{\text{к}}^{\text{н}} = 100 - q_{2\kappa}^{\text{н}} - q_{3\kappa}^{\text{н}} - q_{4\kappa}^{\text{н}} - q_{5\kappa}^{\text{н}} - q_{6\kappa}^{\text{н}}; \quad (3.13)$$

– розрахований за вищою теплотою згорання палива

$$\eta_{\text{к}}^{\text{в}} = 100 - q_{2\kappa}^{\text{в}} - q_{3\kappa}^{\text{в}} - q_{4\kappa}^{\text{в}} - q_{5\kappa}^{\text{в}} - q_{6\kappa}^{\text{в}}; \quad (3.14)$$

Коефіцієнт збереження тепла

– розрахований за нижчою теплотою згоряння палива

$$\varphi^H = 1 - \frac{q_{5K}^H}{\eta_K^H + q_{5K}^H}. \quad (3.15)$$

– розрахований за вищою теплотою згоряння палива

$$\varphi^B = 1 - \frac{q_{5K}^B}{\eta_K^B + q_{5K}^B}. \quad (3.16)$$

Кількість тепла, корисно використана в котлі

$$Q_{ка} = c_p \cdot D_B \cdot (t_B'' - t_B'), \quad (3.17)$$

де теплоємність води в інтервалі температур $t_{вод}' - t_{вод}''$

Витрата палива в котлі

$$B = \frac{Q_{ка}}{Q_B^D \cdot \eta_K^B} \cdot 100. \quad (3.18)$$

3.1.2 Методика розрахунку теплового балансу системи “котел-економізатор”

Втрата теплоти з відхідними газами, віднесена до вищої теплоти згоряння палива в системи «котел-економізатор» згідно [10]

$$q_{2c}^B = \frac{[I_{см} - (\alpha_{см} - \beta'_c) \cdot I_{0\text{ прс}} - \beta'_c \cdot I_{0\text{ х.пов}} + \Delta Q_{конд}^c] \cdot (100 - q_{4c}^B)}{Q_B^D}, \quad (3.19)$$

Кількість теплоти, що виноситься димовими газами з системи до навколишнього середовища

$$\Delta Q_{конд}^c = \varphi \cdot (Q_B^D - Q_H^D - Q_K), \quad (3.20)$$

де Q_K – кількість теплоти, що виділяється в економізаторі при конденсації водяних парів з димових газів

$$Q_K = Q_a + Q_b + Q_c, \quad (3.21)$$

де Q_a – кількість теплоти, що виділяється при конденсації водяного пару та охолодженні конденсату;

Q_b – кількість теплоти, що виділяється при охолодженні газів, що не конденсуються;

Q_c – кількість теплоти, що виділяється при охолодженні водяних парів, що не конденсуються.

$$Q_a = (V_{с.г}^{BX} \cdot \rho_{с.г}^{BX} \cdot d^{BX} - V_{с.г}^{ВИХ} \cdot \rho_{с.г}^{ВИХ} \cdot d^{ВИХ}) \cdot [r_0 + c_{пар} \cdot (t_p - \vartheta^{ВИХ^2})], \quad (3.22)$$

де $V_{с.г}^{BX}$, $V_{с.г}^{ВИХ}$ – об'єм сухих димових газів на вході та виході з економізатора відповідно;

$\rho_{с.г}^{BX}$, $\rho_{с.г}^{ВИХ}$ – густина димових газів на вході та виході з економізатора відповідно;

d^{BX} , $d^{ВИХ}$ – вологовміст димових газів на вході та виході з економізатора відповідно;

$c_{\text{пар}}$ – розрахункова питома теплоємність водяної пари за Л.К. Рамзінім $c_p = 1,97 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

$\vartheta^{\text{вих}2}$ – температура димових газів на виході з економайзера.

$$Q_b = (V_{\text{с.г}}^{\text{вх}} \cdot \rho_{\text{с.г}}^{\text{вх}} \cdot t_p - V_{\text{с.г}}^{\text{вих}} \cdot \rho_{\text{с.г}}^{\text{вих}} \cdot \vartheta^{\text{вих}2}) \cdot c_{p \text{ с.г}}, \quad (3.23)$$

$$Q_c = (V_{\text{с.г}}^{\text{вх}} \cdot \rho_{\text{с.г}}^{\text{вх}} \cdot d^{\text{вх}} - V_{\text{с.г}}^{\text{вих}} \cdot \rho_{\text{с.г}}^{\text{вих}} \cdot d^{\text{вих}}) \cdot c_{p \text{ пар}} \cdot (t_p - \vartheta^{\text{вих}2}), \quad (3.24)$$

де $c_{p \text{ пар}}$ – питома масова теплоємність сухого повітря при, кДж/(кг·К).

3.2 Розрахунок теплового балансу котлоагрегату

3.2.1 Вихідні дані до розрахунку

– Габаритні розміри котла

$$a = 2,862 \text{ м};$$

$$b = 2,3 \text{ м};$$

$$c = 5,828 \text{ м}.$$

– Габаритні розміри економайзера

$$d = 0,9 \text{ м};$$

$$h = 11,65 \text{ м}.$$

– Для водогрійного котла типу ПОЖ ІНКА 5000 температура димових газів перед економайзером t'_r і витрата тріски (при вологості тріски $W=40\%$

$$t'_r = 100 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$B = 2044 \text{ кг/год}.$$

– Теплота вища згоряння палива – наявна теплота

$$Q_b^p = 12,04 \text{ МДж/кг}.$$

– Теплота нища згоряння палива

$$Q_n^p = 10,2 \text{ МДж/кг}.$$

– Параметри води, що нагрівається в котлі

– температури на вході та виході з котла

$$t'_b = 70 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t''_b = 90 \text{ }^\circ\text{C}.$$

– витрата води

$$D_b = 130 \text{ м}^3/\text{год}.$$

– Коефіцієнт надлишку повітря у димових газах α_{yx}^k на вході в економайзер

$$\alpha_{\text{вих}}^k = \alpha_{\text{вх}} = 1,45.$$

3.2.2 Розрахунок ентальпій димових газів і повітря

3.2.2.1 Розрахунок ентальпій виконано згідно з рекомендаціями нормативного теплового розрахунку котельних установок [14] на 1 кг твердого палива. Вихідні дані взято з Розділу 2. Розрахунки виконані за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel.

Результати розрахунків питомих ентальпій вуглекислого газу, азоту, кисню, водяного пару, вологого повітря, золи та ентальпій димових газів і повітря – наведено в таблицях 3.1–3.2.

Таблиця 3.1 — Питомі ентальпії вуглекислого газу, азоту, кисню, водяного пару, вологого повітря, золи

Температура димових газів, ϑ , °C	$(c\vartheta)_{CO_2}$, кДж/м ³	$(c\vartheta)_{N_2}$, кДж/м ³	$(c\vartheta)_{O_2}$, кДж/м ³	$(c\vartheta)_{H_2O}$, кДж/м ³	$(c\vartheta)_{пов}$, кДж/м ³	$(c\vartheta)_{зл}$, кДж/м ³
100	170	130	132	151	132	81
200	357	260	267	304	266	169

Таблиця 3.2 — Результати розрахунку ентальпій димових газів і повітря, кДж/кг

Температура димових газів, ϑ	I_{Γ}^0 , кДж/кг	$I_{пов}^0$, кДж/кг	$I_{зл}^0$, кДж/кг	Ентальпія димових газів по газовому тракту котла, кДж/кг			
				топка		кп	
				1,45		1,5	
°C	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	I_{Γ}	ΔI_{Γ}	I_{Γ}	ΔI_{Γ}
100	527,1	372,3	0,0	695	710	713	729
200	1067,7	749,3	0,0	1405		1442	

3.2.2.2 Згідно результатів розрахунків ентальпія димових газів на вході в економайзер I_{Γ} при температурі $t'_{\Gamma} = 100$ °C

$$I_{\Gamma} = 713 \text{ кДж/кг.}$$

3.2.2.3 При температурі повітря у приміщенні де встановлений котел та економайзер $t_{0 \text{ прс}} = 20$ °C, ентальпія повітря, що присмоктується в газоходи котла

$$I_{0 \text{ прс}} = 74 \text{ кДж/кг.}$$

3.2.3 Відношення кількості повітря на вході до повітряного тракту до теоретично необхідної кількості β' згідно формули (3.8)

$$\beta' = 1,45 - 0,1 = 1,35.$$

3.2.4 Втрата теплоти з відхідними газами в котлі згідно формули (3.4)

—розрахована за вищою теплотою згоряння палива

$$q_{2к}^B = \frac{[713 - (1,5 - 1,3) \cdot 74 - 1,3 \cdot 74 + 1793] \cdot (100 - 1,27)}{12,04 \cdot 10^3} = 22,6\%,$$

де згідно формули (3.9) $\Delta Q_{\text{конд}}^K = 0,985 \cdot (12,04 - 10,22) \cdot 10^3 = 1793$ кДж/кг.

– розрахована за нижчою теплотою згоряння палива, згідно формули (3.10)

$$q_{2к}^H = \frac{(713 - 1,45 \cdot 74) \cdot (100 - 1,45)}{10,22 \cdot 10^3} = 8,6\%.$$

3.2.5 Перерахунок $q_{2к}^H$ на $q_{2к}^B$ згідно формули (3.11)

$$q_{2к}^B = [8,6 + (\frac{12,04}{10,22} - 1) \cdot 100] \cdot \frac{10,22}{12,04} = 22,4\%.$$

3.2.6 Приймаємо втрати теплоти від хімічного, механічного недопалу, з фізичним теплом шлаків відповідно

– за нижчою теплотою згоряння палива

$$q_{3к}^H = 1,5\%,$$

$$q_{4к}^H = 2,4\%,$$

$$q_{6к}^H = 1,1\%.$$

– перерахунок за вищою теплотою згоряння палива, згідно формули (3.12)

$$q_{3к}^B = 1,5 \cdot \frac{10,22}{12,04} = 1,27\%,$$

$$q_{4к}^B = 2,4 \cdot \frac{10,22}{12,04} = 2,04\%,$$

$$q_{6к}^B = 1,1 \cdot \frac{10,22}{12,04} = 0,93\%$$

3.2.7 Розрахунок втрат теплоти від зовнішнього охолодження котла

3.2.7.1 Температура зовнішніх поверхонь котла зі сторони повітря у приміщенні згідно технічних характеристик котла не перевищує 45 °С

$$t_{\text{н}} = 45 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3.2.7.2 Температура повітря у приміщенні, де встановлений котел та економайзер

$$t_{\text{пов}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3.2.7.3 Коефіцієнт тепловіддачі від поверхні обмуровки до повітря у приміщенні

$$\alpha_{\text{пов}} = [9,8 + 0,07 \cdot (t_{\text{н}} - t_{\text{пов}})], \quad (3.25)$$

$$\alpha_{\text{пов}} = 9,8 + 0,07 \cdot (45 - 20) = 11,55 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

3.2.7.4 Орієнтовна поверхня котла розраховується як сума площ сторін котла

$$F_{\text{к}} = (a \cdot b) \cdot 2 + (b \cdot c) \cdot 2 + (a \cdot c) \cdot 2, \quad (3.26)$$

$$F_k = (2,862 \cdot 2,3) \cdot 2 + (2,862 \cdot 5,828) \cdot 2 + (5,828 \cdot 2,3) \cdot 2 = 70 \text{ м}^2.$$

3.2.7.5 Втрати теплоти від зовнішнього охолодження котла

$$q_{5к}^H = \frac{\alpha_{пов} \cdot H_{ка} \cdot (t_H - t_{пов})}{B \cdot Q_p^p} \cdot 100 \quad (3.27)$$

–розрахована за нижчою теплотою згоряння палива

$$q_{5к}^H = \frac{11,55 \cdot 70 \cdot (45 - 20)}{2044 \cdot 10,22} \cdot \frac{3600}{10^6} \cdot 100 = 1,1\%.$$

–розрахована за вищою теплотою згоряння палива

$$q_{5к}^B = \frac{11,55 \cdot 70 \cdot (45 - 20)}{2044 \cdot 12,04} \cdot \frac{3600}{10^6} \cdot 100 = 0,93\%.$$

3.2.8 ККД котла по формулі (3.13)-(3.14) відповідно

–розрахована за нижчою теплотою згоряння палива

$$\eta_k^H = 100 - 8,6 - 1,5 - 2,4 - 1,1 - 0,3 = 86,1\%.$$

–розрахована за вищою теплотою згоряння палива

$$\eta_k^B = 100 - 20,4 - 1,27 - 2,04 - 0,93 - 0,25 = 72,9\%.$$

3.2.9 Коефіцієнт збереження тепла

–розрахований за нижчою теплотою згоряння палива розрахований за формулою (3.15)

$$\varphi^H = 1 - \frac{1,1}{86,1 + 1,1} = 0,987.$$

–розрахований за вищою теплотою згоряння палива розрахований за формулою (3.15)

$$\varphi^B = 1 - \frac{0,25}{72,9 + 0,25} = 0,985.$$

3.2.10 Кількість тепла, корисно використана в котлі формулою (3.17)

$$Q_{ка} = 4,195 \cdot 130 \cdot \frac{971,8}{3600} \cdot (90 - 70) = 2944 \text{ кВт},$$

де теплоємність води в інтервалі температур $t'_B - t''_B$

$$\text{По } t_{пов} = \frac{t'_B - t''_B}{2} = \frac{70 + 90}{2} = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$c_p = 4,195 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\rho = 971,8 \text{ кг/м}^3.$$

3.2.11 Витрата палива в котлі по формулі (3.18)

при $Q_{ка} = 2944 \text{ кВт}$

$$B_p = \frac{2944}{12,04 \cdot 10^3 \cdot 72,9} \cdot 100 = 0,316 \text{ кг/с або } B_p = 0,316 \cdot 3600 = 1137,6 \text{ кг/год.}$$

при $Q_{\text{ка}} = 5000$ кВт

$$B = \frac{5000}{12,04 \cdot 10^3 \cdot 72,9} \cdot 100 = 0,537 \text{ кг/с або } B = 0,537 \cdot 3600 = 1933,2 \text{ кг/год.}$$

Отримані значення ККД котла і витрати палива співставляються з реальними показниками роботи біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль», що свідчить про правильність розрахунків.

3.3 Розрахунок теплового балансу системи «котел-економізатор»

3.3.1 Вихідні дані до розрахунку

- об'єм сухих димових газів $V_{\text{с.г}}^{\text{вх}} = 3,14 \text{ м}^3/\text{кг}$;
- вологовміст димових газів на виході із котла (на вході в калорифер) $d_{\text{г}}^{\text{вх}} = 0,138 \text{ кг/кг с.г.}$;
- температури точки роси $t_{\text{р}} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- температура димових газів на виході з економізатора $\vartheta_{\text{вих2}} = 41 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- розрахункова питома теплоємність водяної пари за Л.К. Рамзінім $c_{\text{р}} = 1,97 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

3.3.2 Згідно формулам (3.22-3.24) кількість теплоти, що виділяється при конденсації водяного пару та охолодженні конденсату; кількість теплоти, що виділяється при охолодженні газів, що не конденсуються; кількість теплоти, що виділяється при охолодженні водяних парів, що не конденсуються відповідно

$$Q_a = (3,14 \cdot 1,83 \cdot 0,138 - 3,14 \cdot 1,83 \cdot 0,053) \cdot [2500 + 1,97 \cdot (60 - 41)] = 1239 \text{ кВт},$$

$$Q_b = (3,14 \cdot 1,83 \cdot 60 - 3,14 \cdot 1,83 \cdot 41) \cdot 1,008 = 110,05 \text{ кВт},$$

$$Q_c = (3,14 \cdot 1,83 \cdot 0,138 - 3,14 \cdot 1,83 \cdot 0,053) \cdot 1,008 \cdot (60 - 41) = 9,35 \text{ кВт}.$$

3.3.3 Тоді, кількість теплоти, що виділяється в економізаторі при конденсації водяних парів з димових газів по формулі (3.21)

$$Q_{\text{к}} = 1239 + 110,05 + 9,35 = 1358,4 \text{ кВт}.$$

$$\Delta Q_{\text{конд}}^{\text{с}} = 0,996 \cdot (12,04 \cdot 10^3 - 10,22 \cdot 10^3 - 1358,4) = 459,8 \text{ кВт}.$$

3.3.4 Втрата теплоти з відхідними газами, для системи «котел-економізатор»

– розрахована за вищою теплотою згоряння палива

$$q_2^{\text{в}} = \frac{[713 - (1,5 - 1,3) \cdot 74 - 1,3 \cdot 74 + 459,8] \cdot (100 - 1,27)}{12,04 \cdot 10^3} = 7,98 \%,$$

– розрахована за нижчою теплотою згоряння палива

$$q_2^H = \frac{(I_{\text{сум}} - \varphi \cdot Q_{\kappa} - (\alpha_{\text{см}} - \beta'_c) \cdot I_{\text{прс}}^0 - \beta'_c \cdot I_{\text{хп}}^0)(100 - q_4^H)}{Q_{\text{н}}^P}; \quad (3.28)$$

$$q_2^H = \frac{(713 - 0,985 \cdot 1358,4 - (1,5 - 1,3) \cdot 74 - 1,3 \cdot 74) \cdot (100 - 1,5)}{10,22 \cdot 10^3} = -6,25\%.$$

3.3.5 Приймаємо втрати теплоти від хімічного, механічного недопалу відповідно до розділу 3.2.4.

3.2.6 Розрахунок втрат теплоти від зовнішнього охолодження системи «котел-економізатор»

3.2.6.1 Орієнтовна поверхня економізатора розраховується як сума площ сторін економізатора

$$F_{\kappa} = \pi \cdot d \cdot h, \quad (3.29)$$

$$F_{\kappa} = 3,14 \cdot 0,9 \cdot 11,65 = 32,9 \text{ м}^2.$$

3.2.6.2 Орієнтовна поверхня системи «котел-економізатор» розраховується як сума поверхонь котла та економізатора

$$F_{\text{с}} = F_{\text{е}} + F_{\kappa}; \quad (3.30)$$

$$F_{\text{с}} = 32,9 + 70 = 102,9 \text{ м}^2.$$

3.2.6.3 Втрати теплоти від зовнішнього охолодження системи «котел-економізатор» за формулою (3.27)

—розрахована за нижчою теплотою згоряння палива

$$q_{5\text{с}}^H = \frac{11,55 \cdot 102,9 \cdot (45 - 20)}{2044 \cdot 10,22} \cdot \frac{3600}{10^6} \cdot 100 = 1,8\%.$$

—розрахована за вищою теплотою згоряння палива

$$q_{5\text{к}}^B = \frac{11,55 \cdot 102,9 \cdot (45 - 20)}{2044 \cdot 12,04} \cdot \frac{3600}{10^6} \cdot 100 = 1,53\%.$$

3.3.7 Втрати теплоти з фізичним теплом конденсату згідно [12]

—за нижчою теплотою згоряння палива

$$q_6^H = I_{\text{конд}} \cdot 100 / Q_{\text{н}}^P, \quad (3.31)$$

де $I_{\text{конд}}$ — ентальпія конденсату, яка визначається за формулою

$$I_{\text{конд}} = (V_{\text{с.г}}^{\text{вх}} \cdot \rho_{\text{с.г}}^{\text{вх}} \cdot d^{\text{вх}} - V_{\text{с.г}}^{\text{вих}} \cdot \rho_{\text{с.г}}^{\text{вих}} \cdot d^{\text{вих}}) \cdot c_{\text{в}} \cdot t_{\kappa}; \quad (3.32)$$

$$I_{\text{конд}} = (3,14 \cdot 1,83 \cdot 0,138 - 3,14 \cdot 1,83 \cdot 0,053) \cdot 4,19 \cdot 40 = 81,86 \text{ кВт}.$$

Тоді,

$$q_6^H = \frac{81,86 \cdot 100}{10,22 \cdot 10^3} = 0,8\%,$$

—за вищою теплотою згоряння палива

$$q_6^B = 0,8 \cdot \frac{10,22}{12,04} = 0,68\%.$$

3.3.8 ККД системи «котел-економізатор» згідно формулам (3.13-3.14)

—за нижчою теплотою згоряння палива

$$\eta^H = 100 - (-6,25) - 1,5 - 2,4 - 1,8 - 0,8 = 99,7 \%,$$

—розрахована за вищою теплотою згоряння палива

$$\eta^B = 100 - 7,98 - 1,27 - 2,04 - 1,53 - 0,68 = 86,5 \%.$$

3.3.9 Витрата палива в котлі згідно формуи (3.18)

при $Q_{\text{ка}} = 2944$ кВт

$$B_p = \frac{2944}{12,04 \cdot 10^3 \cdot 86,5} \cdot 100 = 0,28 \text{ кг/с або } B_p = 0,28 \cdot 3600 = 998 \text{ кг/год.}$$

при $Q_{\text{ка}} = 5000$ кВт

$$B = \frac{5000}{12,04 \cdot 10^3 \cdot 86,5} \cdot 100 = 0,47 \text{ кг/с або } B = 0,47 \cdot 3600 = 1692 \text{ кг/год.}$$

3.3.10 Результати теплового розрахунку котла ПОЖ ІНКА 5000 і системи «котел-економізатор» занесено до табл. 3.3.

Таблиця 3.3 — Результати теплових розрахунків твердопаливного котла ПОЖ ІНКА 5000 та системи «котел-економізатор» біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль»

Показник		Позначення	Одиниці вимірювання	Розрахунок котла ПОЖ ІНКА 5000		Розрахунок системи «котел-економізатор»	
				По Q_H^p	По Q_B^p	По Q_H^p	По Q_B^p
Втрати теплоти	з відхідними газами	q_2	%	8,6	22,6	-6,25	7,98
	з хімічним недопалом	q_3	%	1,5	1,27	1,5	1,27
	з механічним недопалом	q_4	%	2,4	2,04	2,4	2,04
	від зовнішнього охолодження	q_5	%	1,1	0,93	1,8	1,53
	з фізичним теплом шлаків	q_6	%	0,3	0,25	0,8	0,68
Сумарні втрати		$\sum q$	%	13,9	27,1	0,3	13,5
ККД		η	%	86,1	72,9	99,7	86,5
Витрата палива при номінальному навантаженні		B	кг/с	0,537		0,47	
Витрата палива при розрахунковому навантаженні		B_p	кг/с	0,316		0,28	

3.4 Енергетична ефективність від встановлення економайзера

3.4.1 Економія палива за рахунок встановлення економайзера

–при номінальному режимі (потужність котла – 5000 кВт)

$$\Delta B = B_k - B; \quad (3.33)$$

$$\Delta B = 0,537 - 0,47 = 0,067 \text{ кг/с або } \Delta B = 0,067 \cdot 3600 = 241,2 \text{ кг/год.}$$

–при розрахунковому режимі (потужність котла – 2944 кВт)

$$\Delta B_p = B_{pk} - B_p \quad (3.34)$$

$$\Delta B_p = 0,316 - 0,28 = 0,036 \text{ кг/с або } \Delta B_p = 0,036 \cdot 3600 = 129,6 \text{ кг/год.}$$

3.4.2 Максимально потужність системи «котел-економайзер»

$$\Delta Q = Q + Q_{ek} \quad (3.35)$$

$$\Delta Q = 5000 + 1358,4 = 6358,4 \text{ кВт.}$$

3.4.3 Підвищення ККД системи «котел-економайзер» порівняно з ККД котла

–при розрахунку ККД за нижчою теплотою згоряння палива

$$\Delta \eta_n = \eta_n^H - \eta_k^H \quad (3.36)$$

$$\Delta \eta_n = 99,7 - 86,1 = 13,6 \text{ \%}.$$

–при розрахунку ККД за вищою теплотою згоряння палива

$$\Delta \eta_b = \eta_b^B - \eta_k^B \quad (3.37)$$

$$\Delta \eta_b = 86,5 - 72,9 = 13,6 \text{ \%}.$$

3.4.4 Якщо витрата палива в системі «котел-економайзер» залишається сталою, то кількість корисно використаної в ній теплоти

–при номінальному режимі (потужність котла – 5000 кВт)

$$Q_{\text{сист}} = B \cdot Q_p^B \cdot \eta_c^B / 100; \quad (3.38)$$

$$Q_{\text{сист}} = 0,537 \cdot 12,04 \cdot 86,5 / 100 = 5,7 \text{ МВт};$$

–при розрахунковому режимі (потужність котла – 2944 кВт)

$$Q_{\text{сист}} = 0,316 \cdot 12,04 \cdot 86,5 / 100 = 3,35 \text{ МВт.}$$

Ця теплота може витрачатися на отримання основної продукції – гарячої мережевої води у водогрійному котлі.

3.4.5 Розрахунки ККД котла, витрати палива, ККД системи "котел-економайзер" для різної вологості тріски виконані за допомогою програмного забезпечення Excel. Результати розрахунків занесено до табл. 3.4 та представлено на рис. 3.1 – 3.3.

Таблиця 3.4 — Результати розрахунків ККД котла, ККД системи "котел-економізатор" та витрати палива для різної вологості палива – дерев'яної тріски

Вологість палива, %	ККД котла, %	Максимальний ККД системи "котел-економізатор", %	Витрата палива без економізатора, кг/год	Витрата палива з економізатором при максимальному ККД, кг/год
10	92	108,9	1177,6	1106,9
15	91	111,2	1271,9	1177,7
20	90	111,0	1380,3	1258,8
25	89	112,3	1506,2	1352,6
30	88	113,8	1654,3	1455,7
35	87	115,6	1830,6	1574,3
40	86,1	117,8	2053,6	1725,0
45	84,2	120,5	2329,4	1886,8
50	82,8	123,9	2678,9	2089,6
55	81,4	128,3	3135,6	2351,7
60	80	134,3	3756,3	2704,6
65	78,6	142,9	4647,7	3206,9

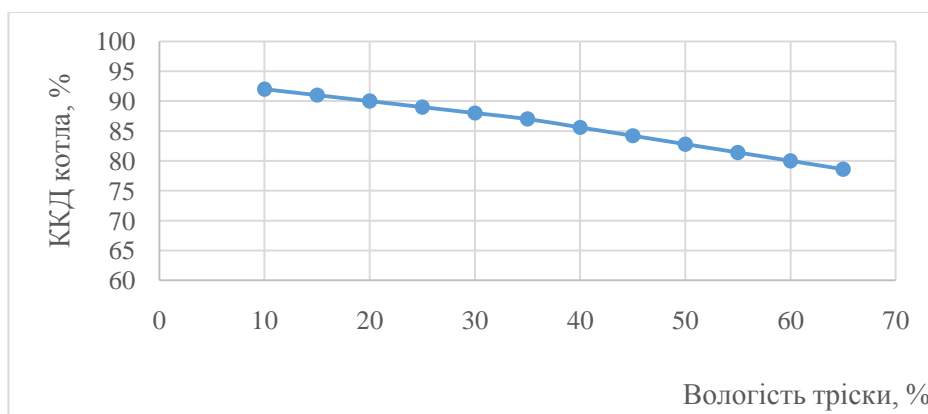


Рисунок 3.1 — Залежність ККД котла ПОЖ ІНКА 5000 від вологості палива

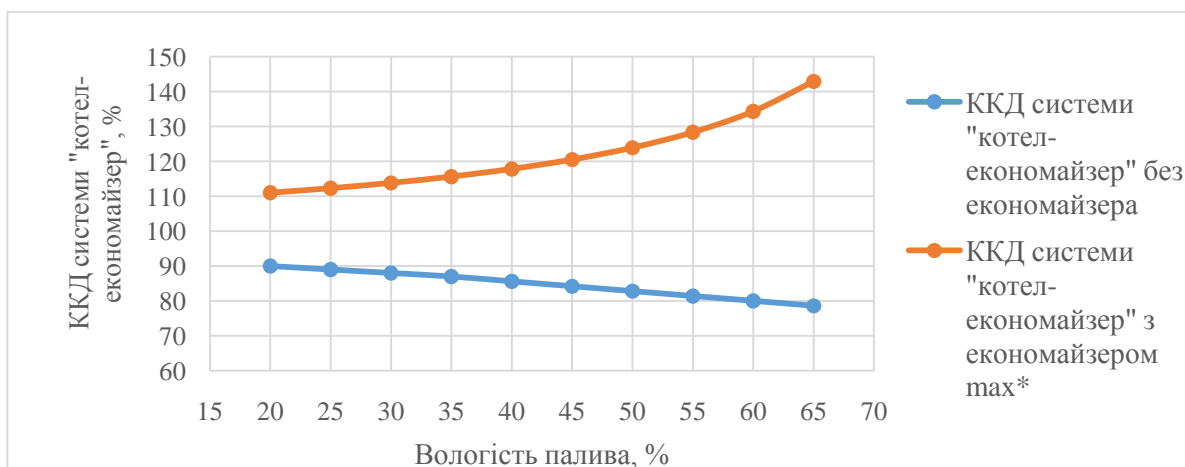


Рисунок 3.2 — Залежність ККД системи "котел-економізатор" від вологості палива при різних режимах роботи котла і ЕК

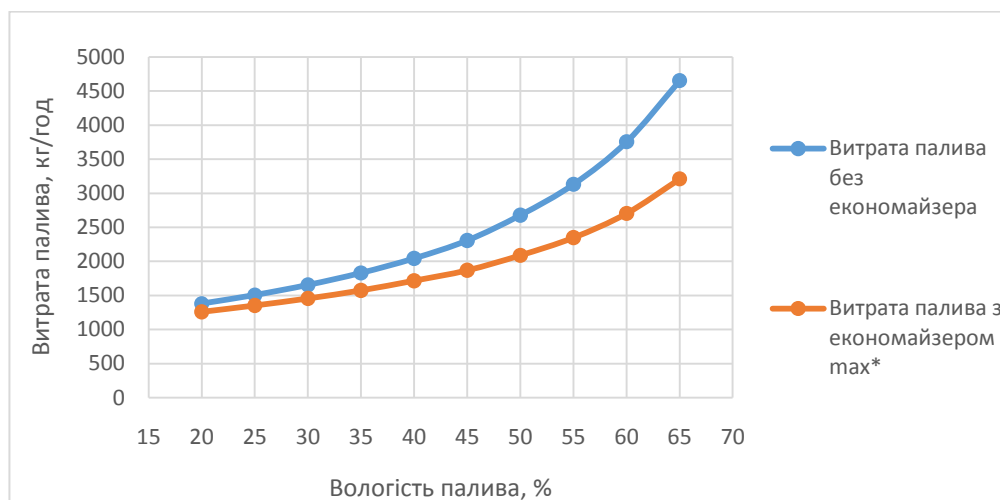


Рисунок 3.3 — Залежність витрати палива від вологості при різних режимах роботи котла і ЕК

3.5 Висновки до розділу 3

В даному розділі виконано тепловий розрахунок біопаливної котельні аеропорту “Бориспіль” для 2х варіантів: без встановлення економайзера та із встановленням економайзера.

На основі результатів теплового розрахунку біопаливної котельні аеропорту “Бориспіль” можна зробити наступні висновки:

1) За рахунок встановлення економайзера

–втрати теплоти з димовими газами зменшуються з 22,6% до 7,98%;

–ККД збільшується на 13,6%: з 86,1% до 99,7% по Q_n^p і з 72,9% до 86,5% по Q_b^p ;

–економія палива складає: при номінальному режимі (потужність котла – 5000 кВт) – 241,2 кг/год; при розрахунковому режимі (потужність котла – 2944 кВт) – 129,6 кг/год;

–при сталій витраті палива котельнею, кількість корисно використаної в системі «котел-економайзер» теплоти: при номінальному режимі (потужність котла – 5000 кВт) – 5700 кВт; при розрахунковому режимі (потужність котла – 2944 кВт) – 3350 кВт.

2) На основі результатів розрахунків ККД котла, витрати палива, ККД системи "котел-економайзер" для різної вологості тріски можна зробити наступні висновки:

–встановлено, що при збільшенні вологості палива на 30% (від 20% до 50%), ККД котла зменшується на 7,2% (від 90% до 82,8%);

– встановлено, що при збільшенні вологості палива на 30% (від 20% до 50%), витрата палива в котлі збільшується на 1298,6 кг/год (від 2678,9 кг/год до 1380,3 кг/год);

– встановлено, що при збільшенні вологості палива на 30% (від 20% до 50%), максимальне ККД системи "котел-економізатор" збільшується на 13% (від 111% до 124%).

4 ЕКОЛОГІЧНИЙ РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ “КОТЕЛ-ЕКОНОМАЙЗЕР” ТА ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ

В процесі спалювання біомаси утворюються забруднюючі речовини, парникові гази та відходи, які разом із продуктами згоряння потрапляють в атмосферне повітря, або можуть потрапляти в ґрунти та воду.

При спалюванні дерев'яної тріски потрібно розраховувати викиди оксидів азоту, сірки і вуглецю, твердих частинок.

4.1 Методика визначення викидів забруднюючих речовин біопаливної котельні

В даному розділі наведена методика ГКД 34.02.305—2002 (Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення) [15], за якою обліковуються викиди оксидів азоту, сірки і вуглецю, твердих частинок. Розрахункові методи визначення викиду забруднювальної речовини базуються на використанні показника емісії.

Валовий викид j -ї забруднювальної речовини E_j , т, що надходить у атмосферу з димовими газами енергетичної установки за проміжок часу P , визначається як сума валових викидів цієї речовини під час спалювання різних видів палива, у тому числі під час їх одночасного спільного спалювання

$$E_j = \sum_i E_{ji} = 10^{-6} \sum_i k_{ji} B_i Q_i^r$$

(4.1)

де E_{ji} – валовий викид j -ї забруднювальної речовини під час спалювання i -го палива за проміжок часу P , т;

k_{ji} – показник емісії j -ї забруднювальної речовини для i -го палива, г/ГДж;

B_i – витрата i -го палива за проміжок часу P , т;

$(Q^r)_i$ – нижча робоча теплота згоряння i -го палива, МДж/кг.

Показники емісії забруднювальних речовин визначаються за формулами (4.2)-(4.4).

4.1.1 Речовини у вигляді суспендованих твердих частинок

Показник емісії речовини у вигляді суспендованих твердих частинок (далі – твердих частинок) визначається як специфічний і розраховується за формулою

$$k_{\text{ТВ}} = \frac{10^6}{Q_i^r} \left(a_{\text{вин}} \frac{A^r}{100} + \frac{q_4}{100} \cdot \frac{Q_i^r}{Q_C} \right) (1 - \eta_{\text{зв}}) + k_{\text{ТС}}, \quad (4.2)$$

де $k_{\text{ТВ}}$ – показник емісії твердих частинок, г/ГДж;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

A^r – масовий вміст золи в паливі на робочу масу, %;

$a_{\text{вин}}$ – частка золи, яка виходить з котла у вигляді леткої золи;

Q_C – теплота згоряння вуглецю до CO_2 , яка дорівнює 32,68 МДж/кг;

q_4 – втрати тепла, пов'язані з механічним недопалом палива, %;

η_{zy} – ефективність очищення димових газів від твердих частинок;

$\Gamma_{вин}$ – масовий вміст горючих речовин у викидах твердих частинок, %;

$k_{твS}$ – показник емісії твердих продуктів взаємодії сорбенту та оксидів сірки і твердих частинок сорбенту, г/ГДж.

Значення ефективності очищення димових газів від твердих частинок η_{zy} визначається за результатами останніх випробувань золоуловлювальної установки або за її паспортними даними. Ефективність золоуловлювальної установки визначається як різниця між одиницею та відношенням масових концентрацій твердих частинок після і до золоуловлювальної установки.

4.1.2 Діоксид сірки SO_2

Показник емісії k_{SO_2} , г/ГДж, оксидів сірки SO_2 та SO_3 , у перерахунку на діоксид сірки SO_2 , які надходять у атмосферу з димовими газами, є специфічним і розраховується за формулою

$$k_{SO_2} = \frac{10^6}{Q_i^r} \frac{2S^r}{100} \left(1 - \eta_I \right) \left(1 - \eta_{II} \beta \right), \quad (4.3)$$

де Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

S^r – вміст сірки в паливі на робочу масу за проміжок часу P , %;

η_I – ефективність зв'язування сірки золою або сорбентом у енергетичній установці;

η_{II} – ефективність очистки димових газів від оксидів сірки;

β – коефіцієнт роботи сіркоочисної установки.

4.1.3 Оксиди азоту NO_x

Під час спалювання органічного палива утворюються оксиди азоту NO_x (оксид азоту NO та діоксид азоту NO_2), викиди яких визначаються в перерахунку на NO_2 .

Показник емісії оксидів азоту k_{NO_x} , г/ГДж, з урахуванням заходів скорочення викиду розраховується як

$$k_{NO_x} = (k_{NO_x})_0 f_n \left(1 - \eta_I \right) \left(1 - \eta_{II} \beta \right), \quad (4.4)$$

де $(k_{NO_x})_0$ – показник емісії оксидів азоту без урахування заходів скорочення викиду, г/ГДж;

f_n – ступінь зменшення викиду NO_x під час роботи на низькому навантаженні;

η_I – ефективність первинних (режимно-технологічних) заходів скорочення викиду;

η_{II} – ефективність вторинних заходів (азотоочисної установки);

β – коефіцієнт роботи азотоочисної установки.

4.1.4 Оксид вуглецю CO

Утворення оксиду вуглецю CO є результатом неповного згоряння вуглецю органічного палива. Зі зменшенням потужності енергетичної установки концентрація CO в димових газах зростає. Основним методом визначення викидів оксиду вуглецю є вимірювання його концентрації.

За відсутності постійних вимірювань концентрації CO валовий викид оксиду вуглецю визначається за формулою (4.1).

4.2 Визначення викидів забруднюючих речовин біопаливної котельні аеропорту “Бориспіль”

4.2.1 Вихідні дані для розрахунку

- 1) Паливо – дерев’яна тріска.
- 2) Теплова потужність котла

$$Q_k = 5 \text{ МВт}.$$

- 3) ККД котла при вологості тріски $W = 40\%$ (З розділу 3)

$$\eta_k^H = 86 \text{ \%}.$$

- 4) Склад палива дерев’яної тріски наведені в таблиці 2.2.

- 5) Теплота нижча згоряння палива

$$Q_H^p = 10,2 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

- 6) Кількість годин роботи установки в номінальному навантаженні

$$t_{\text{річ}} = 8040 \text{ год}.$$

- 7) Об’єм сухих димових газів (див Розділ 2)

$$V_{\text{сг}}^{\text{вх}} = 3,14 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

4.2.2 Розрахунок згідно ГКД 34.02.305—2002 (Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення)

Визначення викидів забруднювальних речовин під час спалювання дерев’яної тріски здійснено розрахунковими методами згідно методики наведених в пункті 4.1.

4.2.2.1 Валовий викид оксидів азоту

а) Показник емісії оксидів азоту дерев’яної тріски без урахування заходів зі зменшення викидів $(k_{\text{NOx}})_0$ становить 200 г/ГДж [15]. Відповідний емпіричний коефіцієнт для розрахунку

ступеня зниження викиду NO_x під час роботи на низькому навантаженні $z = 1,15$. Відповідно до початкових даних та згідно з [15] ефективність первинних заходів зі зменшення викиду оксидів азоту η_I становить 0,6. Азотоочисної установки на енергетичній установці немає, тому ефективність η_{II} та коефіцієнт роботи β дорівнюють нулю. Показник емісії k_{NO_x} оксидів азоту, згідно формули (4.4).

$$k_{\text{NO}_x} = 200 \cdot 5000 / 5000^{1,15} \cdot 1 - 0,6 = 80 \text{ г/ГДж.}$$

б) Валовий викид оксидів азоту, за формулою (4.1)

$$E_{\text{NO}_x} = 10^{-6} \cdot 80 \cdot 10,22 \cdot 16466 = 13,46 \text{ т/рік.}$$

4.2.2.2 Валовий викид сірчистого ангідриду

а) Показник емісії оксидів сірки (у перерахунку на діоксид сірки SO_2), які надходять у атмосферу з димовими газами за проміжок часу P , є специфічним і розраховується за формулою (4.3).

Ефективність зв'язування оксидів сірки золою або сорбентом у енергетичній установці η_I [15] дорівнює нулю. Сірчоочисна установка відсутня, тому ефективність η_{II} та коефіцієнт роботи β дорівнюють нулю. Показник емісії k_{SO_2} оксиду сірки

$$k_{\text{SO}_2} = \frac{10^6}{10,22} \cdot \frac{2 \cdot 0}{100} \cdot 1 - 0 = 0 \text{ г/ГДж.}$$

б) Валовий викид сірчистого ангідриду за формулою (4.1)

$$E_{\text{SO}_2} = 10^{-6} \cdot 0 \cdot 10,22 \cdot 16466 = 0 \text{ т/год.}$$

4.2.2.3 Валові викиди оксидів вуглецю

а) За даними [15] показник емісії оксиду вуглецю k_{CO} становить 195 г/ГДж.

б) Валові викиди оксидів вуглецю E_{CO} за формулою (4.1)

$$E_{\text{CO}} = 10^{-6} \cdot 195 \cdot 10,22 \cdot 16466 = 32,8 \text{ т/год.}$$

4.2.2.4 Валовий викид твердих частинок

Показник емісії твердих частинок визначається як специфічний і розраховується за формулою (4.2). Сірчоочисна установка відсутня, тому викиду твердих частинок сорбенту та продуктів взаємодії сорбенту та оксидів сірки немає.

а) *Без економайзера та мультициклона*

Ефективність золоуловлювальної установки η_{zy} за даними останніх випробувань становить 0,6. Показник емісії твердих частинок

$$k_{ms} = \frac{10^6}{10,22} \cdot \left(\frac{0,15 \cdot 0,6}{100} + \frac{2}{100} \cdot \frac{10,22}{32,68} \right) \cdot 1 - 0,6 = 280 \text{ г/ГДж.}$$

За формулою (4.1) валовий викид твердих частинок

$$E_{\text{тв}} = 10^{-6} \cdot 280 \cdot 10,22 \cdot 16466 = 47,12 \text{ т/рік або } E_{\text{тв}} = 47,12 \cdot 10^5 / 8040 = 586,1 \text{ г/год.}$$

б) *З мультициклоном*

Ефективність золоуловлювальної установки $\eta_{\text{зу}}$ за даними останніх випробувань становить 0,8. Показник емісії твердих частинок

$$k_{\text{тв}} = \frac{10^6}{10,22} \cdot \left(\frac{0,15 \cdot 0,6}{100} + \frac{2}{100} \cdot \frac{10,22}{32,68} \right) \cdot 1 - 0,8 = 140 \text{ г/ГДж.}$$

За формулою (4.1) валовий викид твердих частинок

$$E_{\text{тв}} = 10^{-6} \cdot 140 \cdot 10,22 \cdot 16466 = 23,56 \text{ т/рік або } E_{\text{тв}} = 23,56 \cdot 10^5 / 8040 = 293,0 \text{ г/год.}$$

в) *З економайзером і мультициклоном*

Ефективність золоуловлювальної установки $\eta_{\text{зу}}$ за даними останніх випробувань становить 0,98. Показник емісії твердих частинок

$$k_{\text{тв}} = \frac{10^6}{10,22} \cdot \left(\frac{0,15 \cdot 0,6}{100} + \frac{2}{100} \cdot \frac{10,22}{32,68} \right) \cdot 1 - 0,985 = 14 \text{ г/ГДж.}$$

За формулою (4.1) валовий викид твердих частинок

$$E_{\text{тв}} = 10^{-6} \cdot 14 \cdot 10,22 \cdot 16466 = 2,356 \text{ т/рік або } E_{\text{тв}} = 2,356 \cdot 10^5 / 8040 = 29,3 \text{ г/год.}$$

4.2.2.5 Результати екологічних розрахунків системи «котел-економайзер» біопаливної котельні аеропорту “Бориспіль” занесено до табл. 4.1. Масові валові викиди забруднюючих речовин в димових газах за котлом ПОЖ ІНКА 5000 при спалюванні тріски наведено на рис. 4.1-4.2.

Таблиця 4.1 — Граничні допустимі концентрації забруднюючих речовин згідно діючих нормативів [6] та масові валові викиди розраховані згідно ГКД 34.02.305—2002

Код по інвентаризації	Найменування	ГДК, мг/м ³	Клас небезпеки	Викид, г/с	Викид, г/год	Валовий викид, т/рік
				Розраховані згідно ГКД 34.02.305—2002		
301	Оксиди азоту NO _x	500	3	0,47	1674,42	13,46
330	Ангідрид сірчистий SO _x	500	3	0	0	0
337	Оксид вуглецю CO	250	4	1,13	4081,40	32,81
2902	Речовини у вигляді твердих суспендованих частин	50	3	1,63	5860,95	47,12

Отже, згідно вимог до викидів наказу Мінприроди від 27.06.2006 р. №309 [6] (табл. 1.3) за результатами екологічних розрахунків твердопаливного котла при роботі на дерев'яній трісці можна зробити наступні висновки:

–масові викиди оксидів азоту, оксидів сірки та оксидів вуглецю не перевищують граничне значення 5000 г/год, тому гранично допустимі концентрації викидів оксидів азоту, оксидів сірки та оксидів вуглецю не нормуються,

–масові викиди твердих частинок перевищують граничне значення 500 г/год, тому гранично допустимі концентрації викидів твердих частинок мають бути менші за 50 мг/м³.

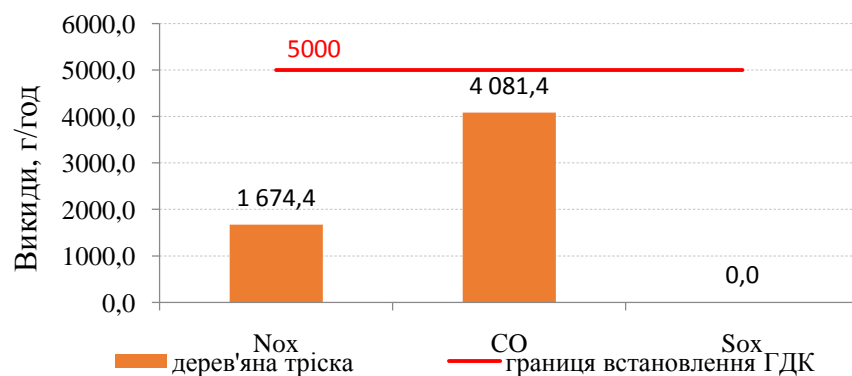


Рисунок 4.1 — Викиди NOx, CO, SOx в димових газах за котлом ПОЖ ІНКА 5000 при спалюванні тріски, г/год

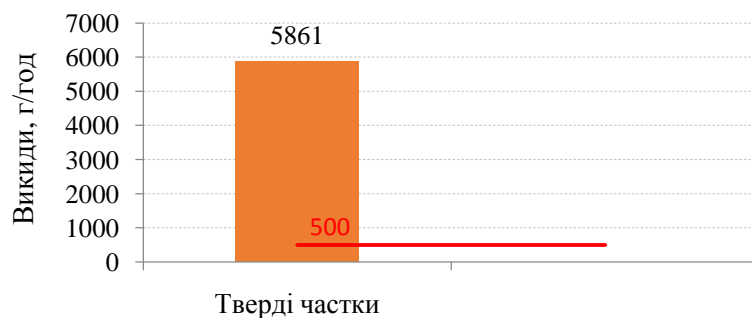


Рисунок 4.2 — Викиди твердих часток в димових газах за котлом ПОЖ ІНКА 5000 при спалюванні тріски, г/год

1.5.1 Перевірка рівня валових викидів шкідливих речовин згідно даних останніх досліджень

4.2.3.1 Результати вимірів концентрацій забруднюючих речовин в атмосферне повітря біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль», згідно додатку Е

–речовини у вигляді суспензованих твердих часток, недиференційованих за складом – 24 мг/м³;

- оксиди азоту (NO_x) – 197 мг/м³;
- оксид вуглецю (CO) – 178 мг/м³;

4.2.3.2 Об'ємна витрата сухих димових газів

–максимальна секундна

$$V_{c,\Gamma}^c = \frac{V_{c,\Gamma}^{BX}}{B_c}, \quad (4.5)$$

де B_c –секундна масова витрата палива, кг/с.

$$V_{c,\Gamma}^c = \frac{3,14}{569} = 1,79 \text{ нм}^3_{c,\Gamma}/\text{с}.$$

–максимальна годинна

$$V_{c,\Gamma}^{\text{год}} = V_{c,\Gamma}^c \cdot 3600 = 1,79 \cdot 3600 = 6431 \text{ нм}^3_{c,\Gamma}/\text{год}.$$

4.2.3.3 Перерахунок i -ї концентрацій забруднюючих речовин в димових газах після котла на нормальні умови ($\text{O}_2=6\%$) здійснюється за формулою

$$c_{\text{н.у. } i} = \frac{21-6}{21-\text{O}_2} \cdot 100 \cdot c_i, \quad (4.6)$$

де c – концентрація i -ї забруднюючої речовини в димових газах після котла;

4.2.3.4 Масовий викид i -ї забруднюючої речовини

$$E_i = \frac{B}{V_{c,\Gamma}^{BX}} \cdot \frac{c_{\text{н.у. } i}}{10^6}. \quad (4.7)$$

4.2.3.5 Розрахунки валових викидів забруднюючих речовин в димових газах після котла при спалюванні дерев'яної тріски виконано в Excel згідно методики наведених в розділі 4.2.3. Результати розрахунків валових викидів наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 — Результати екологічних розрахунків твердопаливного котла ПОЖ ІНКА 5000 біопаливної котельні аеропорту Бориспіль при роботі на дерев'яній трісці за даними реальних замірів (Додаток Г)

Показник	Одиниці вимірювання	NO_x	CO	тв. частинки
Реальні заміри	мг/м ³	197,0	178,0	24,0
Перерахунок на н.у. ($\text{O}_2=6\%$, сух.газів)	мг/нм ³	203,8	184,1	24,8
Секундний масовий викид	г/с	0,36	0,33	0,04
Годинний масовий викид	г/год	1310,5	1184,1	159,7
Граничне значення масових викидів	г/год	5000	5000	500
Вимоги до гранично допустимих концентрацій викидів, не більше	мг/нм ³	Не вимагається	Не вимагається	150

Отже, згідно вимог до викидів наказу Мінприроди від 27.06.2006 р. №309 [6] (табл. 1.3) за результатами реальних замірів концентрацій викидів забруднюючих речовин після твердопаливного котла, при роботі на дерев'яній трісці, можна зробити наступні висновки:

- масові викиди оксидів азоту та оксидів вуглецю не перевищують граничне значення 5000 г/год, тому гранично допустимі концентрації викидів оксидів азоту та оксидів вуглецю не нормуються,

- масові викиди твердих частинок не перевищують граничне значення 500 г/год, тому гранично допустимі концентрації викидів твердих частинок мають бути менші за 150 мг/нм³.

Отже, гранично допустимі концентрації викидів встановлюються для біопаливної котельні аеропорту “Бориспіль” для викидів твердих часток.

4.2.4 Перевірка вимоги ДБН В.2.5-77 «Котельні»

Згідно з ДБН В.2.5-77 «Котельні» [16] існує додаткова вимога, що встановлює обов'язкову наявність системи очистки димових газів від твердих часток, якщо добуток вмісту золи на витрату палива перевищує 5000 кг/год. Цю вимогу слід перевіряти в ході проектування котельні, навіть якщо за викидами забруднюючих речовин вона не перевищує допустиму масову витрату.

4.2.4.1 Добуток $A^p \cdot B^p$

$$A^p \cdot B^p = 0,6 \cdot 2048 = 1228,8.$$

Згідно вимог ДБН В.2.5-77-2014 п.9.4.1 при $A^p \cdot B^p < 5000$ - Система очищення димових газів не вимагається.

1.6 Висновки до розділу 4

При спалюванні дерев'яної тріски в котлі потужністю 5000 кВт, згідно до вимог ДБН В.2.5-77-2014 п.9.4.1 – система очищення димових газів не вимагається.

Результати екологічних розрахунків (теоретично) співставляються з результатами реальних замірів концентрацій викидів забруднюючих речовин після твердопаливного котла, при роботі на дерев'яній трісці і, згідно нормативів наказу Мінприроди від 27.06.2006 р. №309:

- для викидів оксидів азоту, оксидів сірки та оксидів вуглецю гранично допустимі концентрації не нормуються;

- при теоретичному розрахунку концентрацій викидів забруднюючих речовин: масові викиди твердих частинок перевищують граничне значення 500 г/год, тому гранично допустимі концентрації викидів твердих частинок мають бути менші за 50 мг/нм³;

- за результатами реальних замірів концентрацій викидів забруднюючих речовин: масові викиди твердих частинок не перевищують граничне значення 500 г/год, тому гранично допустимі концентрації викидів твердих частинок мають бути менші за 150 мг/нм³. Така різниця між розрахунками теоретичними та за результатами реальних замірів пояснюється тим, що при проведенні замірів котел працював на неповну потужність.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ БІОПАЛИВНОЇ КОТЕЛЬНОЇ АЕРОПОРТУ “БОРИСПІЛЬ”

В даному розділі роботи передбачається проаналізувати роботу водогрійної опалювальної котельні зі встановленням водогрійного твердопаливного котла виробництва корпорації ІНКА (Харків), тепловою потужністю 5000 кВт та економайзер для глибинного охолодження димових газів групи компаній Enerstena (Литва), тепловою потужністю 1000 кВт.

5.1 Опис експериментів на економайзері Enerstena СЕВ 1000

У біопаливній котельні встановлені датчики для вимірювання параметрів димових газів, води та конденсату.

Температура димових газів перед економайзером і за ним вимірюється датчиками E1W07-BT1 і E1W07-BT2 відповідно. Тиск/тяга димових газів перед економайзером і за ним вимірюється в датчиках в електрозаслонках з електроприводом E1W07-BP2 і E1W07-BP3 відповідно. Температура води, що нагрівається перед економайзером і за ним вимірюється датчиками E1W12-BT3 і E1W12-BT4 відповідно.

Під час експериментального дослідження роботи біопаливної котельні аеропорту “Бориспіль”, було оброблено данні 24 режимів роботи котельні у період січень-квітень 2017 року. Значення температур води, димових газів на вході та виході та потужності економайзера та котла виводяться на мнемосхему пульта управління котельнею (рис 5.1). Режимні параметри роботи біопаливної котельні з економайзером, представлені на мнемосхемах пульта управління, у кількості 24 штуки у Додатку Ж.

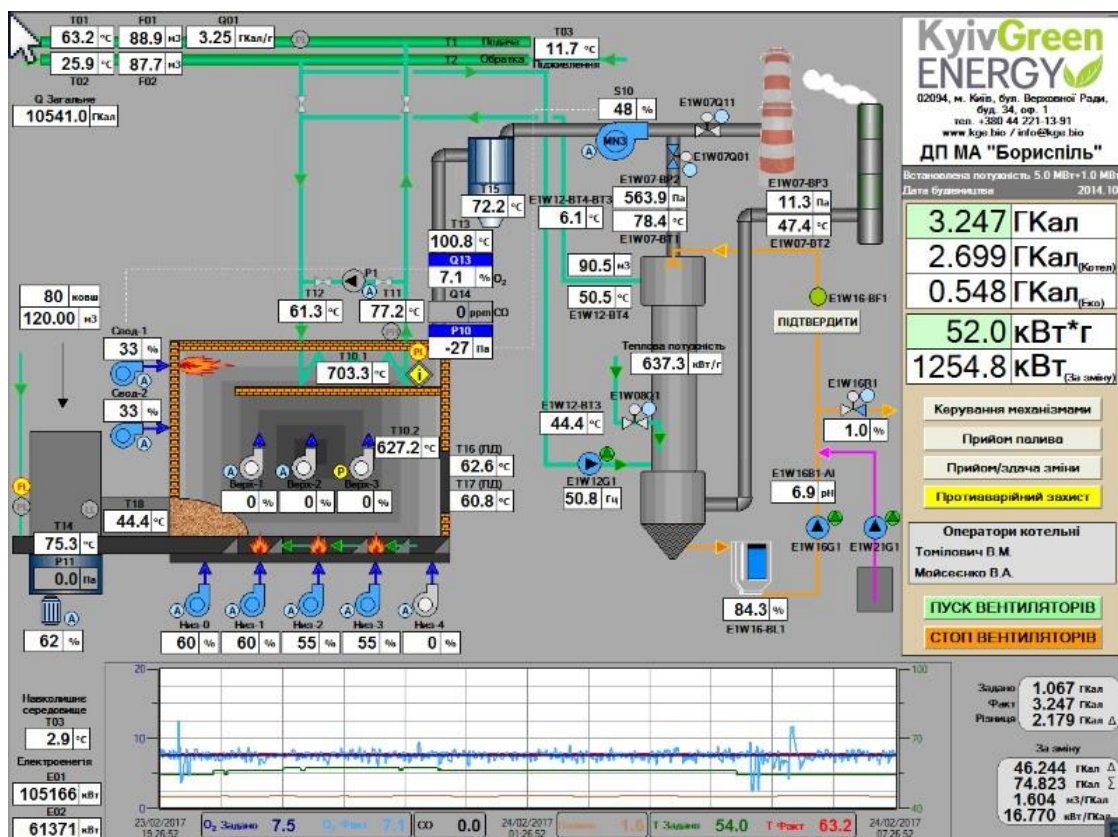


Рисунок 5.1 — Мнемосхема пульта управління котельнею

5.2 Опис результатів експериментів на економайзері Enerstena CEB 1000

Результати експериментів занесено до таблиці 5.2. На основі отриманих даних, побудовані графіки: залежність потужності економайзера від потужності котла (рис. 5.2), залежність потужності економайзера від температури вхідної води в економайзер (рис. 5.3), залежність потужності економайзера від різниці температур води на вході та виході в економайзер (рис. 5.4), залежність температури у подаючому та зворотньому трубопроводах від температури навколишнього середовища (рис. 5.5).

Таблиця 5.2 — Режимні параметри роботи біопаливної котельні з економайзером

№ експерименту	Температури, °С					Потужність, кВт		
	Вода, що нагрівається, вхід	Вода, що нагрівається, вихід	Навколишнє середовище	Димові газы, вхід	Димові газы, вихід	Котел	Економайзер	Загальна
1	52,5	56,2	-6,9	88,6	56,2	4362,3	105,9	4468,2
2	52,1	56,6	-5,9	79	56	6054,6	322,4	6376,9
3	49,6	54,4	-4,8	79,8	53,2	3597,6	408,5	4006,1
4	49,0	54,9	-4,5	85,7	53,5	4990,8	711,1	5701,9
5	48,8	54,6	-3,9	75	54,1	3080,8	147,8	3228,6
6	48,5	52,7	0	88,6	51,9	4297,1	473,7	4770,8
7	48,1	54,4	-4,4	87,6	52,5	4841,8	860,1	5701,9
8	47,6	53,8	-0,7	93,8	51,7	4217,9	713,5	4931,4
9	47,4	52,7	-4	86,3	50,7	4042,2	564,5	4606,7
10	47,3	53,5	-5,2	86,5	51,2	6293,1	626,2	6919,3
11	47,2	51,6	-1,5	60,9	49,5	2759,6	498,1	3257,7
12	46,2	52,4	-1,5	82,5	50	4049,2	701,8	4751,0
13	46,1	50,8	4,5	76,7	48,7	3660,4	494,7	4155,1
14	45,7	51,1	-0,8	66,4	48,1	2788,7	562,2	3350,8
15	45,5	51,1	-2,5	72,8	49,4	3243,8	492,3	3736,1
16	45,4	51,8	4,6	71,7	48,7	2714,2	690,2	3404,4
17	45,2	52,4	2,8	75,2	48,8	3391,6	760,0	4151,6
18	44,9	50,2	-5,3	79,7	48,9	4183,0	452,8	4635,8
19	44,8	50	-2,9	84,9	47,9	4242,4	598,2	4840,6
20	44,4	50,5	2,9	78,4	47,7	3141,3	637,8	3779,1
21	44,1	49,2	-5	71,4	47,8	3711,6	403,9	4115,5
22	42,6	48,6	-0,4	68	45,3	3018,0	637,8	3655,8
23	40,5	42,6	3,2	70,6	41,3	2850,4	251,4	3101,8
24	40,2	41,7	6,7	53,5	40,9	1411,8	161,8	1573,6

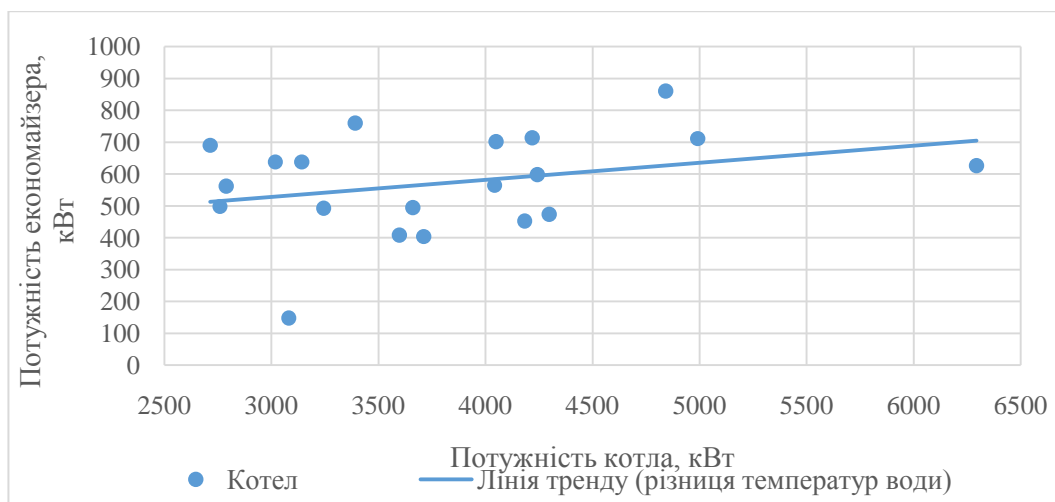


Рисунок 5.2 — Залежність потужності економайзера від потужності котла

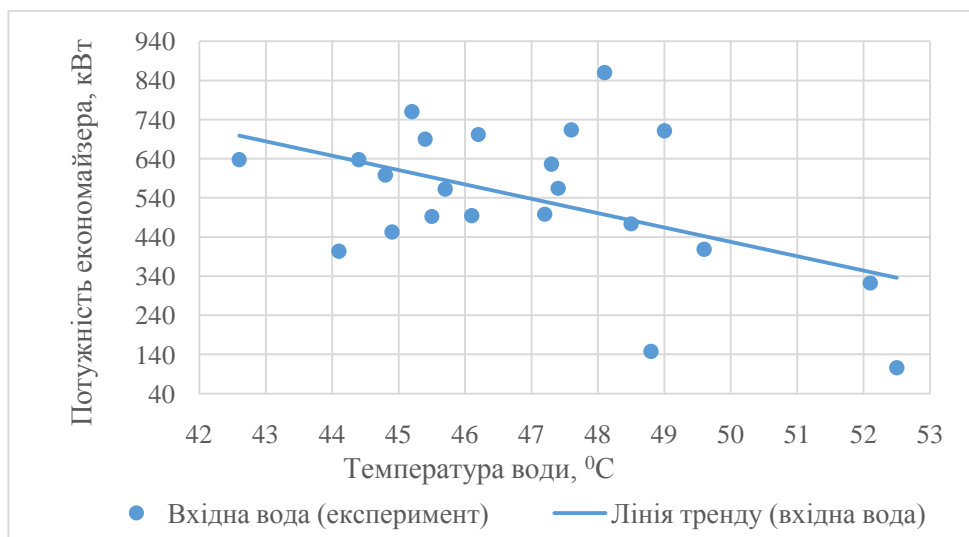


Рисунок 5.3 — Залежність потужності економайзера від температури вхідної води в економайзер

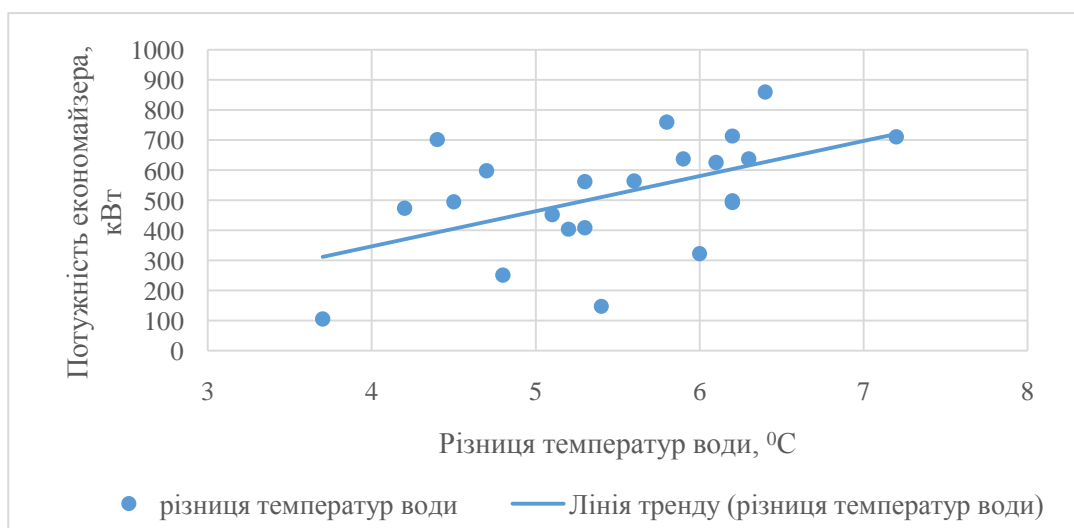


Рисунок 5.4 — Залежність потужності економайзера від різниці температур води на вході та виході в економайзер

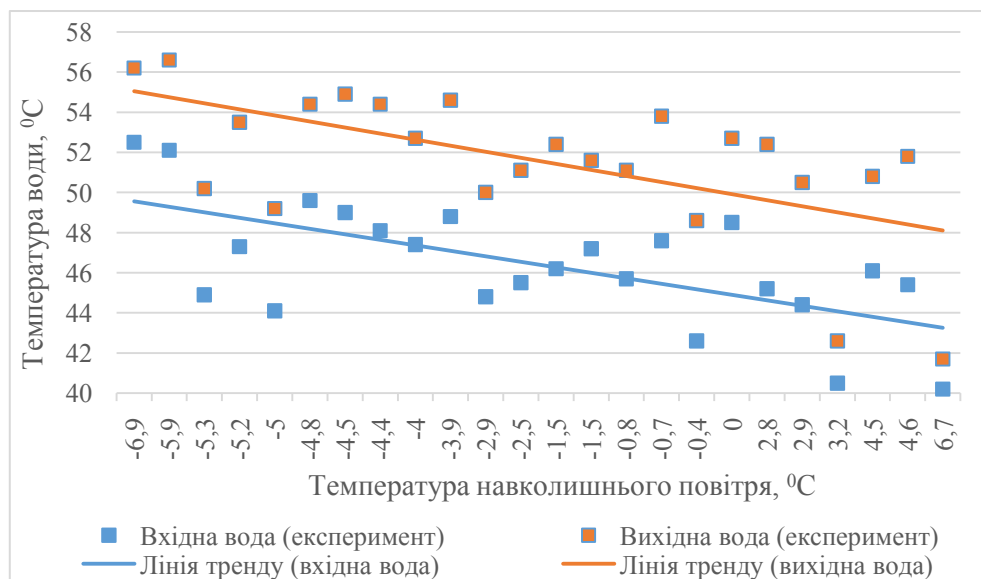


Рисунок 5.5 — Залежність температури води у подаючому та зворотньому трубопроводах економайзера від температури навколишнього середовища

Для розрахунку залежності потужності економайзера від вологості палива, приймаємо наступне припущення: вологість палива визначаємо з теоретичного графіку (рис. 5.6) при експериментальних значеннях температури зворотньої води (води на вході в економайзер) та при експериментально визначеній потужності економайзера.

Графік на рис. 5.6 побудовано при середній температурі димових газів на вході в економайзер 120°C , середній потужності котла 5 МВт і середньому вмісту кисню у димових газів на вході в економайзер 6,5%.

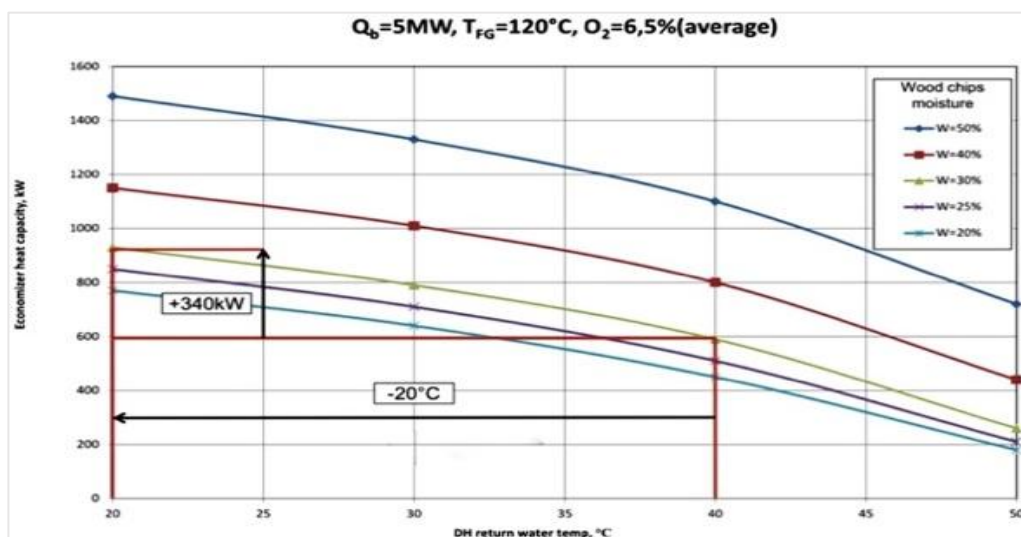


Рисунок 5.6 — Теоретичний графік залежності потужності економайзера, від температури вхідної води в економайзер для різних вологостей палива (робоча документація Enerstena)

Результати визначення вологості палива з теоретичного графіку представлені в таблиці 5.3.

На основі даних наведених в таблиці 5.3 побудовано залежність потужності економайзера (експеримент) від вологості палива (визначеної з теоретичного графіку) (рис. 5.7).

Таблиця 5.3 — Результати визначення вологості палива з теоретичного графіку

№ експерименту	Температура вхідної води в економайзер (експеримент), °С	Потужність ЕК (експеримент), кВт	Вологість (з теоретичного графіку), %
1	44,1	403,87	26,7
2	44,9	452,75	30,56
3	45,5	487,67	33,813
4	46,1	494,65	35,355
5	42,6	637,81	36,562
6	47,2	498,14	38,198
7	52,1	322,40	38,6
8	45,7	562,16	38,72
9	44,8	598,24	38,869
10	48,5	473,70	39,8
11	44,4	637,81	40,167
12	47,4	564,49	41,523
13	45,4	690,19	41,913
14	47,3	626,17	43,452
15	46,2	704,15	44,658
16	45,2	760,02	45,254
17	47,6	713,46	46,742
18	49	711,14	48,438
19	48,1	857,79	52,186
20	49,6	408,53	67,393

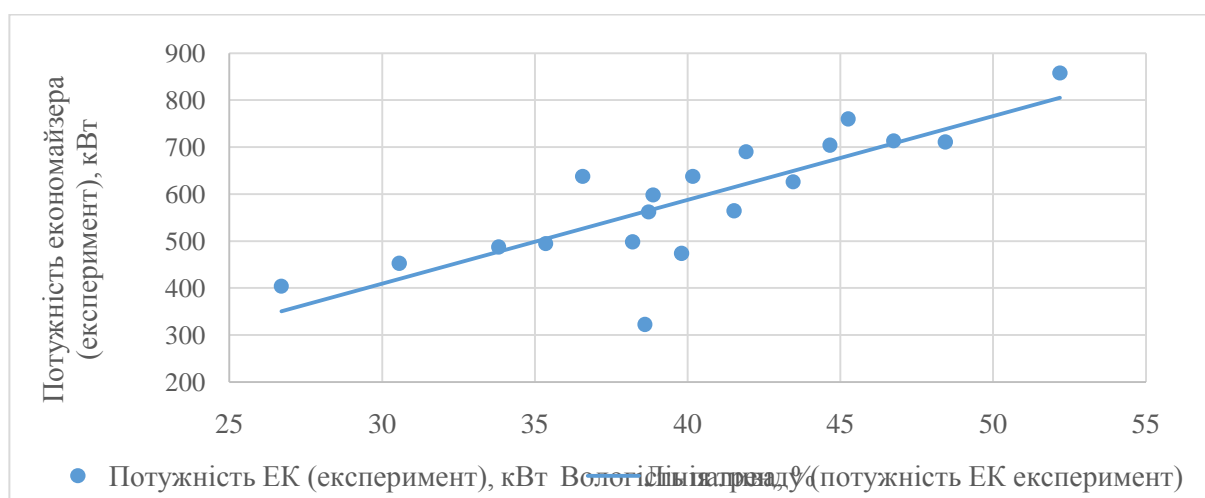


Рисунок 5.7 — Залежність потужності економайзера (експеримент) від вологості палива (визначеної з теоретичного графіку)

5.3 Висновки до розділу 5

Під час експериментального дослідження роботи біопаливної котельні аеропорту “Бориспіль”, було оброблено дані 24 режимів роботи котельні у період січень-квітень 2017 року.

На основі експериментального дослідження роботи біопаливної котельні аеропорту “Бориспіль” можна зробити наступні висновки:

–встановлено, що при збільшенні потужності котла на 2 МВт (від 3МВт до 5МВт), потужність економайзера зросла на 100 кВт (від 520 кВт до 620 кВт). Отже, потужність економайзера збільшується пропорційно до збільшення потужності котла;

–встановлено, що при зменшенні температури вхідної води в економайзер на 10 °С (від 52,5 °С до 42,5 °С), потужність економайзера зросла на 350 кВт (від 340 до 690 кВт). Отже, потужність економайзера збільшується пропорційно до зменшення температури вхідної води в економайзер;

–встановлено, що при збільшенні різниці температур води на вході та виході в економайзер на 3 °С (від 4 °С до 7 °С), потужність економайзера зросла на 350 кВт (від 350 до 700 кВт). Отже, потужність економайзера збільшується пропорційно до збільшення різниці температур води на вході та виході в економайзер;

–встановлено, що при збільшенні температури навколишнього середовища на 13,6 °С (від -6,9 °С до 6,7 °С), температури води у подаючому трубопроводі економайзера знизилась на 6 °С (від 50 °С до 44 °С). Отже, температури води у подаючому та зворотньому трубопроводах економайзера зменшується пропорційно до збільшення температури навколишнього середовища;

–встановлено, що при збільшенні вологості палива на 26% (від 26% до 52%), потужність економайзера зросла на 450 кВт (від 350 до 800 кВт). Отже, потужність економайзера збільшується пропорційно до збільшення вологості палива.

6 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООБМІНУ В ЕКОНОМАЙЗЕРІ

Математичне моделювання було здійснено на базі програмного забезпечення Solid Works.

6.1 Постановка задачі

Ціль роботи: дослідити теплообмін між потоками рідини, визначити ефективність конденсаційного економайзера для глибинного охолодження димових газів для варіантів: без перегородок по ходу робочого тіла – води та з ними.

1.1 Розробка геометричної моделі експериментальної установки.

1.2 Проведення експериментів з дослідження процесу теплообміну в конденсаційному економайзері.

1.3 Проведення експериментів з дослідження процесу теплообміну в конденсаційному економайзері з встановленням перегородок.

Конструкція та опис роботи конденсаційного економайзера ENERSTENA CEB 1000

Економайзер ENERSTENA CEB 1000 – вертикальний кожухотрубний теплообмінник з камерою змішування, що складається з опорної рами, корпусу, та конденсатної системи.

Опорна рама призначена для підтримання економайзера в вертикальному положенні та розподілення навантаження на фундамент.

Корпус економайзера – вертикальна зварна конструкція круглого перетину з ввареними в неї теплообмінними трубками у кількості 367 трубок. В верхній частині корпусу є отвір для підводу димових газів діаметром 840мм. В нижній частині корпус має отвір для відводу димових газів діаметром 640мм, а також в нижній частині корпусу є ємність для збору конденсату. Димові гази надходять всередину трубок. Вода надходить в міжтрубний простір. Систему руху теплоносіїв – протитичійна. Патрубки для входу та виходу води, що нагрівається зовнішнім діаметром 168,3мм.

Конденсатна схема економайзера забезпечує подачу та розпилення конденсату в димових газах перед входом в теплообмінні трубки економайзера. Дане рішення дозволяє забезпечити максимальний відбір тепла з димових газів, а також очистити димові гази від залишків золи та смол що залишились після циклонів.

Далі конденсат стікає в нижню частину економайзера, проходить механічну очистку і за допомогою насосу знову подається в верхню частину економайзера. Конденсат циркулює по замкнутій схемі і його кількість постійно збільшується за рахунок конденсації димових газів. Надлишок конденсату скидається в систему каналізації після очистки та нейтралізації.

6.2 Геометричне моделювання

Для спрощення розрахунків та раціонального використання комп'ютерних потужностей було змодельовано, згідно до таблиць 6.1–6.3: кожух економайзера, патрубки, теплообмінні труби, у кількості 367 шт.

Вихідні дані для моделювання наведено у таблицях 6.1–6.3.

Таблиця 6.1 — Характеристики та розміри економайзера

Орієнтація	Тип економайзера	Внутрішній діаметр кожуха, мм	Висота кожуха, мм
вертикальний	поверхневий	840	11650

Таблиця 6.2 — Характеристики та розміри трубної решітки

Довжина однієї теплообмінної трубки, мм	Внутрішній діаметр трубки, мм	Зовнішній діаметр трубки, мм	Кількість теплообмінних трубок, шт
9067	22	26	367

Таблиця 6.3 — Розміри патрубків

Назва	ДУ	Розміри
Вхід води	150	Ø168,3×4,5
Вихід води	150	Ø168,3×4,5
Вхід продуктів згоряння	-	Ø840×5
Вихід продуктів згоряння	-	Ø640×5

Результати геометричного моделювання наведено на рис. 6.1 – 6.7.

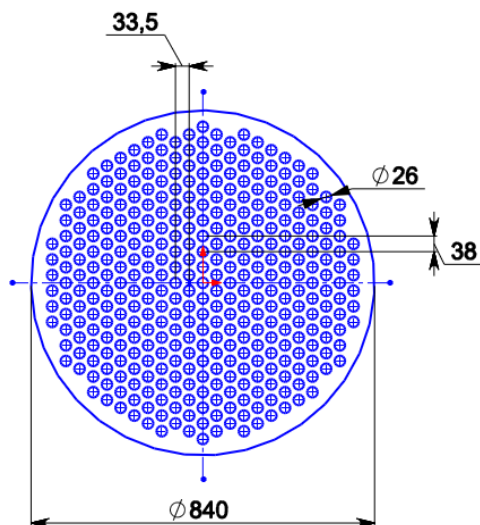


Рисунок 6.1 — Ескіз трубної решітки

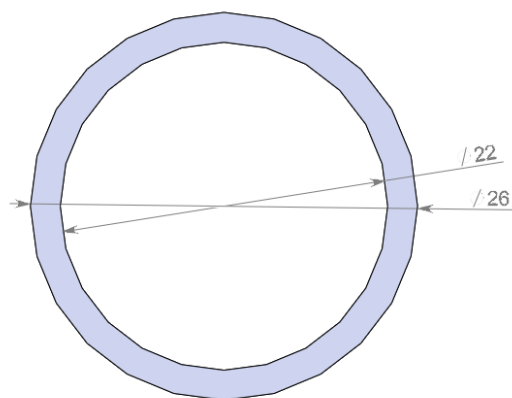


Рисунок 6.2 — Ескіз теплообмінної трубки

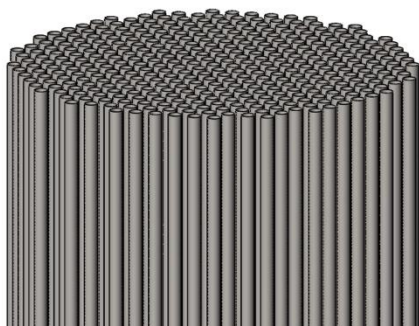


Рисунок 6.3 — Трубний пучок

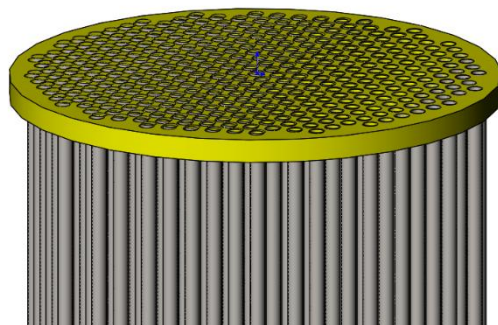
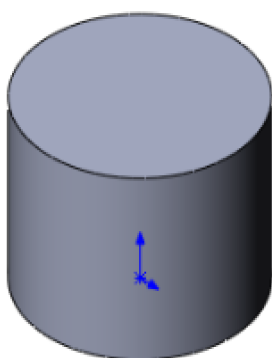
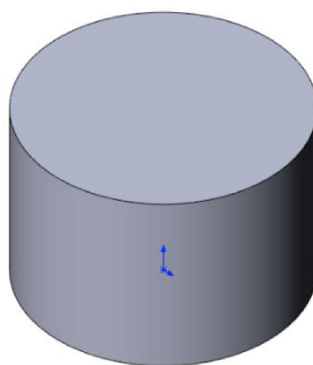


Рисунок 6.4 — Збірка. Трубний пучок і
трубна решітка



а)



б)



в)

а) Для входу і виходу води; б) Для входу продуктів згоряння; в) Для виходу продуктів згоряння

Рисунок 6.5 — Патрубки



Рисунок 6.6 — Кожух економайзера

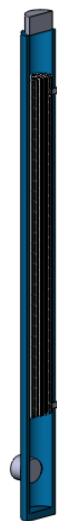


Рисунок 6.7 — Збірка. Кожух
економайзера, трубна решітка та патрубки

6.3 Проведення експериментів

6.3.1 Експеримент 1 – Моделювання процесу теплообміну біля вхідного патрубка води.

Граничні умови представлено у табл. 6.4 та на рис. 6.8.

Таблиця 6.4 — Вихідні дані для задання граничних умов для експерименту 1

Назва патрубка	Витрата теплоносія	Температура, К	Тиск, Па
Димові гази вхід	3,06 кг/с	359,45	101565
Вода вхід	0,006 м ³ /с	340	101325



Рисунок 6.8 — Задання граничних умов

Для спрощення розрахунків та раціонального використання комп'ютерних потужностей, розрахункову область було розбито на дві симетричні частини.

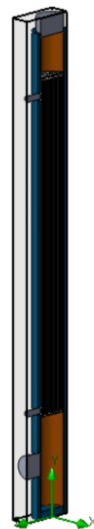


Рисунок 6.9 — Розрахункова область моделі

Результати моделювання наведено на рис. 11-15.

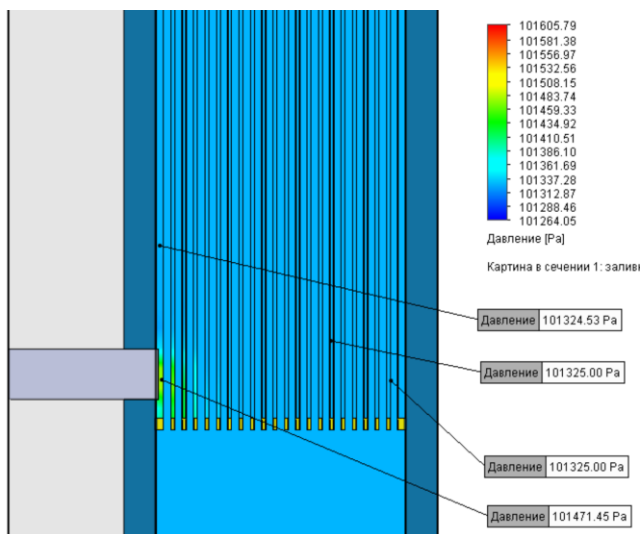


Рисунок 6.10 — Розподіл тиску біля
вхідного патрубка для води

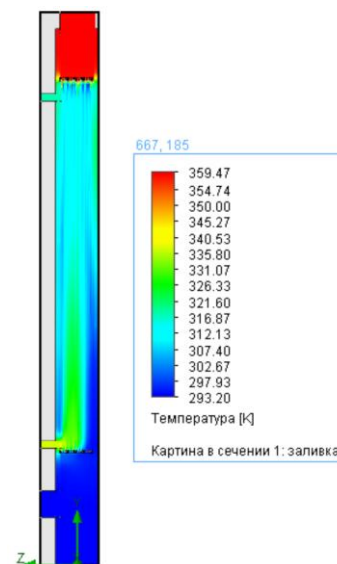


Рисунок 6.11 — Розподіл температур у
моделі

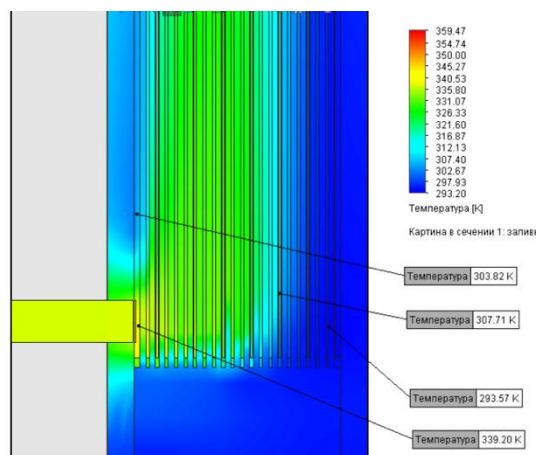


Рисунок 6.12 — Розподіл температури біля вхідного патрубка для води

При натіканні вхідної води на трубний пучок спостерігається зона підвищеного тиску.

Найкраще охолодження трубного пучка спостерігається ближче до патрубка вхідної води. В центрі трубного пучка інтенсивність охолодження більш низька.

Висновок 1 В центрі трубного пучка інтенсивність охолодження більш низька. Температура в твердому тілі змінюється в допустимих межах.

6.3.2 Експеримент 2 – Моделювання процесу теплообміну у Економізаторі при встановленні перегородок по ходу теплоносія, що нагрівається – води

6.3.2.1 Встановлення перегородок в між трубному просторі

6.3.2.1.1 Ширина перегородки

Ширину перегородки обираємо згідно рекомендаціям

$$m = (0,6 \div 0,8) \cdot D_{\text{вн}};$$

$$m = 0,6 \cdot 0,84 = 0,505 \text{ м.}$$

Параметри улаштування поперечних перегородок у вигляді дисків з відрізними сегментами розраховуємо на основі наступних співвідношень

Площа перерізу між трубного простору

$$S_{\text{МТР}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{вн}}^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{\text{н}}^2 \cdot n}{4},$$

де $D_{\text{вн}}$ - внутрішній діаметр корпусу ТОА;

$d_{\text{н}}$ - зовнішній діаметр трубок;

n – кількість трубок в трубній решітці.

$$S_{\text{МТР}} = \frac{3,14 \cdot 0,840^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 0,026^2 \cdot 367}{4} = 0,359 \text{ м}^2.$$

6.3.2.1.2 Відстань між перегородками

$$S_{\text{МТР}} = D_{\text{вн}} \cdot h \cdot \left(1 - \frac{d_{\text{н}}}{S}\right),$$

де $S = 0,0335$ м - крок трубного пучка.

Звідси,

$$h = \frac{S_{\text{МТР}}}{\left(1 - \frac{d_{\text{н}}}{S}\right) \cdot D_{\text{вн}}} = \frac{0,359}{\left(1 - \frac{0,026}{0,0335}\right) \cdot 0,84} = 1,909 \text{ м.}$$

6.3.2.1.3 Кількість перегородок

$$C = \frac{l}{h} - 1,$$

де l - довжина трубок;

h - відстань між перегородками.

$$C = \frac{9,067}{1,909} - 1 = 3,75 \approx 4 \text{ шт.}$$

Для уникнення застійної зони, враховуючи що патрубки для підведення та відведення води розташовані з одного боку, кількість перегородок збільшуємо на одну $C = 5$ шт. Тоді, реальна відстаня між перегородками по висоті

$$h = \frac{l}{C+1} = \frac{9,067}{5+1} = 1,511 \text{ м.}$$

Розташування перегородок в між трубному просторі теплообмінника зображено на рис. 6.13.

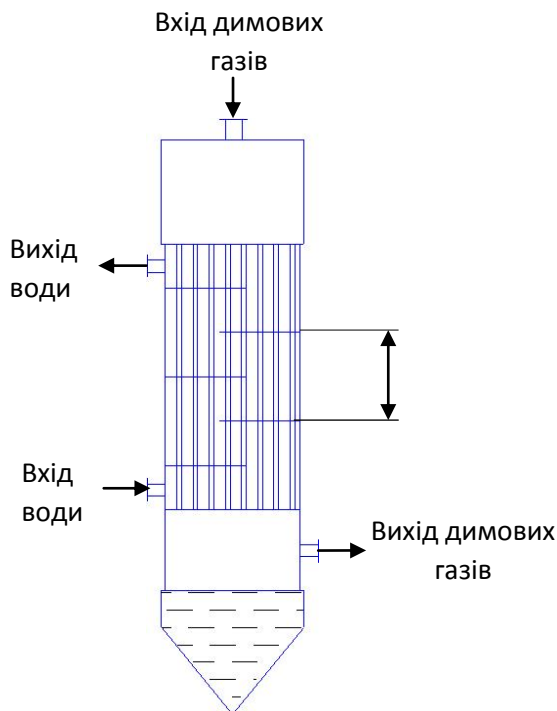


Рисунок 6.13 — Розташування перегородок в між трубному просторі теплообмінника.

6.3.2.2 Геометричне моделювання

Згідно розрахунків встановлення перегородок в між трубному просторі (див. розділ 6.3.2.1) було змодельовано, згідно до таблиці 6.5 перегородку та встановлено її у трубний пучок.

Таблиця 6.5 — Розміри перегородки

Ширина перегородки, мм	Відстань між перегородками по висоті, мм	Товщина перегородки, мм	Кількість перегородок, шт
505	1511	10	5

Результати геометричного моделювання наведено на рис. 6.14 – 6.18.

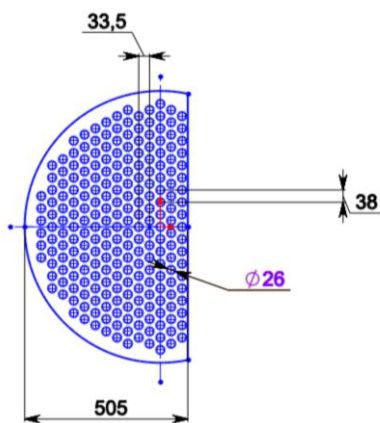


Рисунок 6.14 — Ескіз перегородки



Рисунок 6.15 — Збірка. Перегородки у трубному пучку

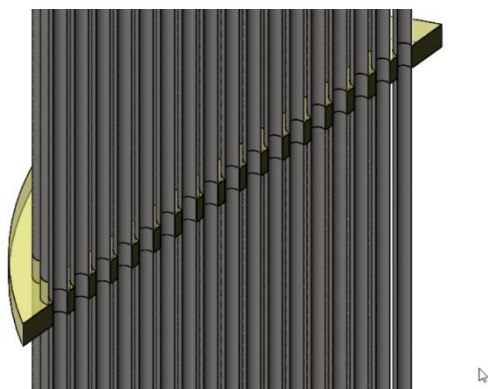


Рисунок 6.16 — Розріз 1. Перегородка у трубному пучку

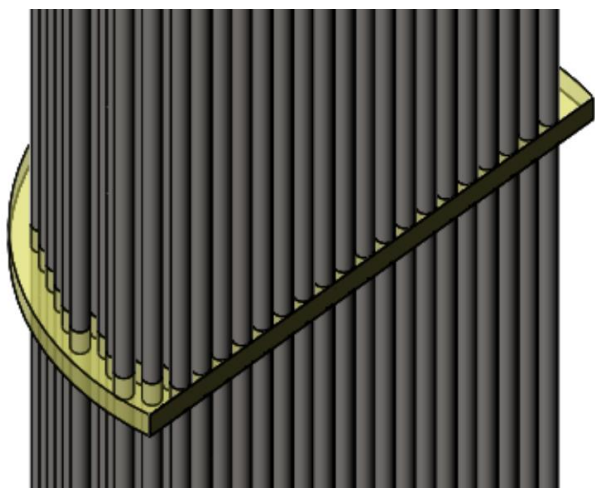


Рисунок 6.17 — Розріз 2. Перегородка у трубному пучку

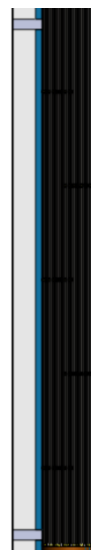


Рисунок 6.18 — Збірка. Трубний пучок з перегородками у корпусі економайзера

Граничні умови задані аналогічно до Експерименту 1.

2.3 Результати моделювання

Результати моделювання наведено на рис. 6.19-6.21.

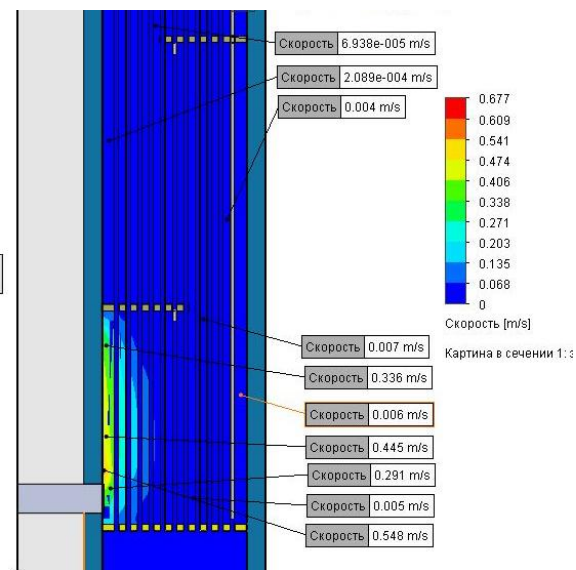


Рисунок 6.19 — Розподіл швидкості
у економайзері 1

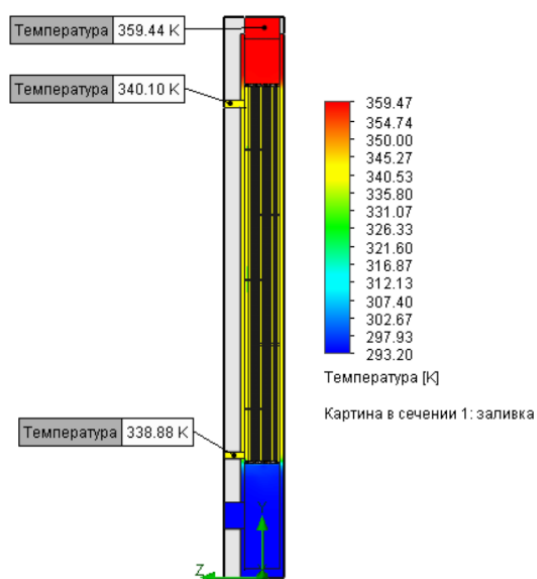


Рисунок 6.20 — Розподіл температури
у економайзері 2

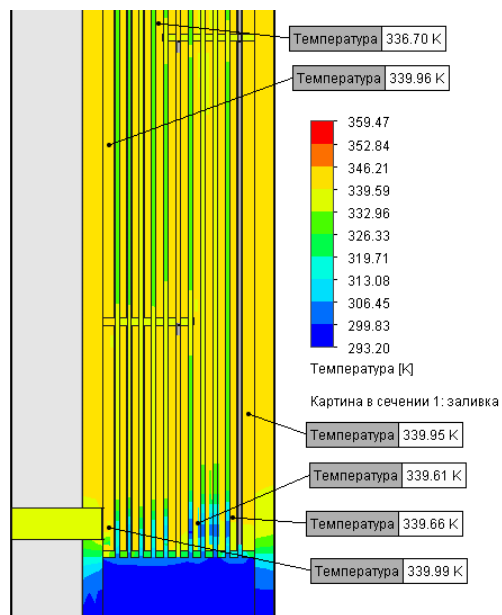


Рисунок 6.21 — Розподіл температури у економайзері 2

Швидкість теплоносія, що нагрівається (вода) порівняно з експериментом 1 (без перегородок) зросла від 4,092 м/с до 4,907 м/с. Температура теплоносія, що нагрівається (вода)

порівняно з експериментом 1 (без перегородок) зросла від 340K до 344K. Температура гріючого теплоносія (димові гази) знизилась від 358K до 312K.

Висновок 2 Встановлення перегородок призводить до більш рівномірного розподілу температур та швидкостей по ширині корпусу та дозволяє збільшити теплове навантаження економайзера, що дозволяє нагрівати теплоносії, що нагрівається – воду, до більш високих температур, та охолодити димові гази до більш низьких.

6.4 Висновки до розділу 6

За допомогою програмного забезпечення SolidWorks'14 було проведене комп'ютерне моделювання у вигляді двох експериментів. За результатами отриманих результатів, можна зробити наступні висновки:

- Виявлено частини економайзера, у яких інтенсивність теплообміну може бути збільшена (наприклад за рахунок встановлення перегородок по ходу теплоносія, що нагрівається – води).
- В центрі трубного пучка інтенсивність охолодження більш низька.
- Температура в твердому тілі змінюється в допустимих межах.
- Температура гріючого теплоносія (димові гази) знижується в економайзері на 36 °C (358K до 322K), що співставляється з натурним експериментом.
- Температура теплоносія, що нагрівається (вода) підвищується в економайзері на 3 °C (340K до 343K), що співставляється з натурним експериментом.
- За рахунок встановлення перегородок інтенсивність теплообміну була збільшена.
- Встановлення перегородок призводить до більш рівномірного розподілу температур та швидкостей по ширині корпусу та дозволяє збільшити теплове навантаження економайзера, що дозволяє нагрівати теплоносії, що нагрівається – воду, до більш високих температур (з 340K до 344K), та охолодити димові гази до більш низьких (з 358K до 312K).

Отже, перевірено коректність комп'ютерного моделювання, виявлено частини економайзера, у яких інтенсивність теплообміну може бути збільшена, виконано конструктивну зміну в економайзері для збільшення інтенсивності теплообміну та оцінено результати моделювання. З урахуванням збільшення інтенсивності теплообміну конструктивні зміни в економайзері є доцільними.

7 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

7.1 Опис ідеї проекту

Згідно Енергетичної стратегії України до 2035 року, Україна має намір скоротити споживання викопного палива та збільшити частку відновлюваних джерел енергії з 4% (у 2016 р.) до 25% (у 2035 р.) від загального обсягу постачання первинної енергії. В Україні, в останні роки, частка біомаси від усіх відновлюваних джерел енергії становить 80%, і очікується, що ця частка залишиться основною і в майбутньому. Отже, проекти, що заміщують викопне паливо (вугілля, природний газ) біомасою, популярні в Україні зараз, і їх кількість буде збільшуватися в майбутньому.

Стосовно напряму енергозбереження в практиці виробництва теплової енергії котельними установками, то він реалізується шляхом застосування сучасних технологій глибокої утилізації теплоти відхідних газів котлів. Критерієм теплової ефективності теплоутилізаційної системи зазвичай слугує рівень підвищення ККД або коефіцієнта використання теплоти палива КВТП котла, який повинен відповідати розрахунку балансу котла та котельної установки з системою теплоутилізації за вищою теплотою згоряння палива, тобто з урахуванням теплоти конденсації водяної пари, що міститься в відхідних димових газах. Очевидно, що чим нижча температура відхідних газів, а відповідно і вищий рівень конденсації водяної пари в теплоутилізаційному устаткуванні та менший вологовміст димових газів на виході із нього, тим вища ефективність теплоутилізації і величина приросту ККД (КВТП) котельної установки.

Економайзер для глибокого охолодження димових газів дозволяє охолодити димові гази нижче температури точки роси і, за рахунок цього, нагріти воду власних потреб котельні (сиру чи хімічно підготовлену), гарячого водопостачання, низькотемпературних систем опалення і т.ін. Додатково, за рахунок використання “явної” та прихованої теплоти димових газів можна утилізувати до 20% скидного тепла.

7.2 Автори та організація проекту

Таблиця 7.1 — Автори проекту

Прізвище, ім'я, по батькові	Місце роботи (для студентів – факультет, група), адреса ел. пошти	Підпис
Гелетуха Софія Георгіївна	НТУУ «КПІ» ТЕФ, ТП-61м, магістрантка, sofiagetuha@gmail.com	
Назарова Ірина Олександрівна	НТУУ «КПІ» імені І.Сікорського, ТЕФ, к.т.н., доц.	

7.3 Аналіз ідеї проекту

7.3.1 Вид проекту

Вид проекту – це дослідно технологічна робота. Досліджувалась технологія отримання льодяних труб з внутрішнім оребренням методом лиття та льодяних труб із зовнішнім оребренням.

7.3.2 Спрямованість проекту

Проект спрямований на економію енергоресурсів, адже “приховану” теплоту відхидних газів після котла можна використовувати для нагріву зворотньої води системи тепlopостачання перед котлом.

7.3.3 Зміст ідеї проекту

Таблиця 7.2 — Зміст ідеї проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Встановлення економайзера для глибокого охолодження димових газів в біопаливних котельнях	Муніципальна теплоенергетика	Економія енергоресурсів (біопалива)
		Можливість використання теплоти димових газів для нагріву води власних потреб котельні, гарячого водопостачання, низькотемпературних систем опалення і т.ін.

7.3.4 Визначення характеристик ідеї проекту

В табл. 7.3 наведено характеристики ідеї проекту, наведено сильні та слабкі сторони у порівнянні з найближчими конкурентами.

Таблиця 7.3 — Характеристики ідеї проекту

Техніко-економічні характеристики ідеї	Продукція конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
	Мій проект	Кон-т 1 (типові водогрійні біопаливні котельні)	Кон-т 2 (біопаливні водогрійні котельні з контактними утилізаторами)			
Експлуатація економайзерів в біопаливній котельній	наявна	Відсутня	Відсутня	-	+	+

Експлуатація економайзерів в біопаливній котельній в “мокрому” режимі	наявна	Відсутня	Відсутня	-	+	+
---	--------	----------	----------	---	---	---

7.3.5 Технологічний аудит ідеї проекту

Аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару, надання послуги) та технологічна здійсненність ідеї проекту наведено таблиці 7.4.

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Глибока утилізація теплоти димових газів	Охолодження димових газів в економайзерах нижче температури точки роси.	Наявна	Доступні
Використання теплоти димових газів для нагріву води власних потреб котельні, гарячого водопостачання, низькотемпературних систем опалення і т.ін.	Нагрів води в економайзері, за рахунок охолодження димових газів після котла	Наявна	Доступні

Таблиця 7.4 — Технологічний аудит ідеї проекту

7.3.6 Висновок щодо науково-технічного рівня ідеї

Власна оцінка науково-технічного рівня розробки, що пропонується:

- немає аналогів в світі або краща за існуючі в світі аналоги;
- на рівні кращих світових аналогів;
- немає аналогів в Україні;
- **краща за існуючі в Україні аналоги за основними показниками;**
- перевищує існуючі в Україні аналогічні розробки за окремими показниками.

7.4 Аналіз ринкових можливостей запуску проекту

7.4.1 Характеристика потенційних споживачів.

Характеристики потенційного споживача проекту наведено у таблиці 7.5.

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Особливості поведінки споживачів	Вимоги споживачів до товару
--------------------------	-------------------	----------------------------------	-----------------------------

Зменшення витрати енергоресурсів (біопалива) на потреби систем опалення, гарячого водопостачання	Споживачі теплоти і джерела теплопостачання	Зменшення витрат на опалення і ГВП будівель	Температура нагрітої води в економайзері – не менше 45 градусів.
--	---	---	--

Таблиця 7.5 — Характеристика потенційного споживача

7.4.2 SWOT-аналіз проекту

Сильні сторони (S) Економія витрати біопалива; Підвищення ККД котельні; Збільшення теплової потужності котельні.	Слабкі сторони (W) Потреба встановлення додаткового обладнання; Збільшення експлуатаційних витрат на привод насосів та димососів, через збільшення опорів водяного та газового трактів; Висока вартість обладнання.
Можливості (O) Використання теплоти димових газів для нагріву води власних потреб котельні, гарячого водопостачання, низькотемпературних систем опалення і т.ін.	Загрози (T) Відсутність ринку

Таблиця 7.6 — Аналіз сильних та слабких сторін проекту

7.4.3 Оцінка ризиків проекту

На основі проведеного SWOT-аналізу виділено найзагрозливіші, якими необхідно управляти для того, щоб реалізація проекту стала можливою. Експертним шляхом визначено параметри ризику. Ризики проекту наведено у таблиці 7.7.

Таблиця 7.7 — Ризики проекту

Найменування ризику	Міра ризику	Ступінь ризику	Рівень ризику	Метод мінімізації
Виробничий ризик	0,1	критичний	низький	Придбати якісне устаткування
Збутовий ризик	0,2	критичний	низький	Правильно розрахована вартість установки
Політичні ризики	0,5	відсутні	відсутні	Немає

7.5 Оцінка економічної ефективності глибокої утилізації теплоти димових газів в економайзері

7.5.1 Економічна ефективність утилізації, грн/рік

$$E_{\phi} = (Q_{\text{ут}} \cdot \Pi_{\text{T}} - B_{\text{екс}}) - \frac{\mu \cdot K}{Z_{\text{н}}}, \quad (6.1)$$

де $Q_{\text{ут}}$ – річна кількість утилізованої теплоти, Гкал/рік;

Π_{T} – тариф на продаж ТЕ для біопаливної котельні в аеропорту “Бориспіль”

$$\Pi_{\text{T}} = 1097 \text{ грн/Гкал};$$

$B_{\text{екс}}$ – додаткові експлуатаційні витрати, грн/рік;

μ – коефіцієнт, що залежить від терміну служби обладнання. Приймаємо

$$\mu = 1,2;$$

K – додаткові капіталовкладення в експлуатаційну установку, грн;

$Z_{\text{н}}$ – нормативний термін окупності додаткових капіталовкладень, років.

7.5.2 Капіталовкладення в проект

7.5.2.1 Вартість економайзера Enerstena СЕВ 1000, згідно даних від виробника, грн

$$K_{\text{ек}} = 60000\$ \text{ або } K_{\text{ек}} = 60000 \cdot 28 = 1580 \text{ тис. грн};$$

7.5.2.2 Сумарні капіталовкладення з урахуванням запірно-регулюючої арматури та монтажу, грн

$$K = K_{\text{k}} (K_{\text{ек}} + K_{\text{дод}}), \quad (6.2)$$

де K_{k} – коефіцієнт, яким враховується непередбачені капіталовкладення. Приймаємо

$$K_{\text{k}} = 1,2;$$

$K_{\text{дод}}$ – капіталовкладення у запірно-регулюючу арматуру, монтаж та допоміжне обладнання, згідно даних від виробника складає

$$K_{\text{дод}} = 3000\$ \text{ або } K_{\text{ек}} = 3000 \cdot 28 = 84 \text{ тис. грн};$$

Згідно формули (6.2)

$$K = 1,2 \cdot (1580 + 84) = 1997 \text{ тис. грн.}$$

7.5.3 Додаткові експлуатаційні витрати на теплоутилізаційну установку, грн/рік

$$B_{\text{екс}} = 1,1 \cdot \left[\frac{(\Delta P_{\Gamma} + \Delta P_{\Gamma \text{ м}}) \cdot L_{\Gamma}}{10^3 \cdot \eta_{\text{д}} \cdot \rho_{\Gamma}} + \frac{(\Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{в м}}) \cdot G_{\text{в}}}{10^3 \cdot \eta_{\text{н}}} \right] \cdot n_0 \cdot 24 \cdot C_{\text{е}}, \quad (6.3)$$

де ΔP_{Γ} – втрати тиску по тракту димових газів для економайзера, Па;

$\Delta P_{\Gamma \text{ м}}$ – втрати тиску по тракту димових газів на тертя та місцеві опори, для економайзера, Па;

L_{Γ} – витрата сухих димових газів, кг/с;

$\eta_{\text{д}}$ – ККД димососа;

ρ_{Γ} – густина сухих димових газів, кг/м³

$\Delta P_{\text{в}}$ – втрати тиску по тракту води для економайзера, Па;

$\Delta P_{\text{в м}}$ – втрати тиску по тракту води на тертя та місцеві опори, для економайзера, Па;

$G_{\text{в}}$ – витрата води, кг/с;

$\eta_{\text{н}}$ – ККД насоса;

$C_{\text{е}}$ – вартість одиниці електроенергії, грн/кВт·год.

Приймаємо $\eta_{\text{д}} = 0,83$; $\eta_{\text{н}} = 0,68$; $\rho_{\Gamma} = 0,75 \text{ кг/м}^3$, величини ΔP_{Γ} , $\Delta P_{\Gamma \text{ м}}$, $\Delta P_{\text{в}}$, $\Delta P_{\text{в м}}$ – згідно технічного паспорту економайзера; $C_{\text{е}} = 1,68$ грн/кВт·год.

Економайзер працює цілорічно, цілодобово за винятком планових ремонтів і тех. оглядів 2 рази на рік по 15 діб. Тоді, кількість діб, що працює економайзер

$$n_0 = 365 - 2 \cdot 15 = 335 \text{ діб або } n_0 = 335 \cdot 24 = 8040 \text{ год.}$$

З результатів розрахунків димових газів (Розділ 2)

$$L_{\Gamma} = 3,06 \text{ кг/с}; G_{\text{в}} = 0,6 \text{ кг/с.}$$

7.5.4 Річна додаткова витрата електроенергії на привід димососа та на привід циркуляційного насоса для води при встановленні економайзера, кВт

$$E_{\text{екс}} = 1,1 \cdot \left[\frac{(700 + 800) \cdot 3,06}{10^3 \cdot 0,83 \cdot 0,75} + \frac{(700 + 1000) \cdot 0,6}{10^3 \cdot 0,68} \right] \cdot 335 \cdot 24 = 78477,2 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Річна витрата електроенергії на котельню без економайзера 404659,2 кВт·год.

Отже, відсоток річної додаткової витрати електроенергії при встановленні економайзера по відношенню до річної витрати електроенергії на котельню без економайзера

$$n = \frac{78477,2}{404659,2} \cdot 100 = 19,4\%.$$

Згідно формули (6.3), додаткові експлуатаційні витрати на теплоутилізаційну установку, грн/рік

$$B_{\text{екс}} = E_{\text{екс}} \cdot C_e = 78477,2 \cdot 1,68 = 131,8 \text{ тис. грн/рік.}$$

7.5.4 Річний відпуск тепла споживачам за рахунок роботи економайзера, Гкал/рік

$$Q_{\text{ут}} = Q_{\text{ек}} \cdot n_0, \quad (7.3)$$

де $Q_{\text{ек}}$ – кількість додаткової потужності за рахунок роботи економайзера. Приймаємо середню потужність економайзера протягом року

$$Q_E = 0,5 \text{ МВт або } Q_{\text{ек}} = 0,43 \text{ Гкал/год};$$

Згідно формули (7.3)

$$Q_{\text{ут}} = 0,43 \cdot 8040 = 3457,2 \text{ Гкал/рік.}$$

7.5.5 Економічна ефективність утилізації теплоти димових газів в економайзері, згідно формули (6.1), грн/рік

$$E_{\phi} = (3457,2 \cdot 1097 - 131800) - \frac{1,2 \cdot 1997000}{10} = 3421 \text{ тис. грн/рік.}$$

7.5.6 Термін окупності додаткових капіталовкладень, років

$$Z = \frac{\mu \cdot K \cdot \Phi}{(C_{\text{т}} \cdot Q_{\text{ут}} - B_{\text{екс}}) \cdot Z_{\text{т}}}, \quad (7.4)$$

де Φ – термін зміни виробничої технології, років. Приймаємо $\Phi = 50$ років.

Термін окупності, згідно формули (7.4)

$$Z = \frac{1,2 \cdot 1997000 \cdot 50}{(3457,2 \cdot 1097 - 131800) \cdot 10} = 3,3 \text{ років.}$$

Такий термін окупності є прийнятним для сфери енергетики.

7.6 Висновки до розділу 7

Економія енергоресурсів та зниження рівня викидів твердих часток – критерії, які роблять даний проект привабливим для інвестора. Технологію глибокої утилізації теплоти димових газів можна використовувати для підвищення енергетичної та екологічної ефективності біопаливних котелень. Економічна ефективність утилізації теплоти димових газів в економайзері 3421 тис.

грн/рік. Термін окупності такого проекту становить 3,3 роки, що є прийнятним для сфери енергетики.

8 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці — це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності.

Тема магістерської дисертації: «Підвищення ефективності біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль»».

Твердопаливна водогрійна котельня призначена для покриття потреби аеропорту «Бориспіль» на опалення та гаряче водопостачання. Котельня розташована на території аеропорту «Бориспіль». Кількість нових водогрійних котлів, що встановлені в котельні – один. Основне паливо – деревна тріска, резервне не передбачено.

Основне обладнання котельні, що проектується:

1. Система завантаження палива
2. Топка
3. Котел
4. Система димоходів та очистки димових газів
5. Економайзер
6. Система контуру теплоносія в котельні

В даному розділі запропоновані технічні рішення та організаційні заходи з безпеки експлуатації технологічного обладнання твердопаливної котельні, а також технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії та визначені основні заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях.

8.1 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки експлуатації технологічного обладнання твердопаливної котельні.

Експлуатація котельні буде вестися кваліфікованим експлуатаційним персоналом, що має відповідний рівень підготовки та дозволи на виконання своїх посадових обов'язків.

Для управління роботою, забезпечення безпечних умов і розрахункових режимів експлуатації котел оснащений:

- а) пристроями, які запобігають підвищенню тиску (запобіжними пристроями);
- б) показчиками рівня води;
- в) манометрами;
- г) приладами для вимірювання температури середовища;
- д) запірною і регулюючою арматурою;
- є) приладами безпеки;
- ж) живильними пристроями.

Оснащення контрольно-вимірювальними приладами котла відповідає вимогам галузевої НД, погодженої з Держнаглядом охорони праці України.

Комплектно з технологічним обладнанням заводом-виробником котла поставляється комплект автоматики та система керування.

Система автоматики забезпечує контроль, автоматичне регулювання, технологічний захист обладнання та сигналізацію виходу технологічних параметрів за межі уставок, а також зберігання зібраної інформації і формування звітів за заданий проміжок часу з можливістю виведення на монітор або на принтер.

Уся інформація про протікання технологічного процесу виводиться на монітор, що встановлюється в приміщенні операторської.

8.1.1 Вимоги з техніки безпеки при виконанні будівельно-монтажних робіт

Мають бути розроблені наступні вимоги з техніки безпеки при виконанні будівельно-монтажних робіт:

- заходи і вимоги, які повинні бути передбачені виконавцями робіт на об'єктах будівництва і монтажу при багаторушних сумісних роботах (як правило, багаторушні роботи в одному просторі не допускаються, а в багатоповерхових будівлях допускаються через один поверх);

- заходи з аварійно-рятувальних робіт на об'єктах будівництва на випадок обвалення, вибуху, пожежі;

- організацію системи постачання інформацією, циркулярами, інформаційними листами, вказівками з техніки безпеки;

- комплексний план координації діяльності структурних підрозділів будівництва з охорони праці та техніки безпеки;

- інструкції з охорони праці та техніки безпеки з окремих видів робіт, а також програми навчання і тематику необхідних наочних посібників;

- заходи з підготовки кадрів та перевірки знань з техніки безпеки.

8.1.2 Технологічні рішення щодо створення сприятливих та комфортних умов праці на робочих місцях

З метою створення сприятливих та комфортних умов праці на робочих місцях і в робочих зонах організовується механічний або природний притік повітря, що забезпечує нормальні кліматичні умови (температуру, відносну вологість, шум та ін..)

Розташування основного та допоміжного обладнання виконано так, щоб воно знаходилося в зоні обслуговування.

Обладнання і трубопроводи вибрано з умов забезпечення міцності, як при експлуатаційних параметрах, так і при аварійному підвищенні тиску до величини спрацювання запобіжних

пристроїв. Запобіжні пристрої налагоджуються на величину перевищення у відповідності з вимогами чинних норм і правил.

Захист від шумових дій детально розглянуто в ОВНС.

Закладені у проекті заходи і конструктивні рішення забезпечують рівень шуму у відповідності з санітарними нормами в будівлі котельні, допоміжних приміщеннях та навколишньої території.

При виробничому процесі в котельні токсикологічний вплив на персонал відсутній.

8.1.3 Сигнально-попереджувальне та пізнавальне пофарбування, знаки безпеки

Пізнавальне кольорове пофарбування трубопроводів виконується суцільним по всій поверхні комунікацій у відповідності з ГОСТ 14202–69.

Сигнальні кольори і знаки безпеки для привернення уваги працюючих до безпосередньої небезпеки, попередження про можливу небезпеку, приписи і дозволи визначених дій з метою забезпечення безпеки, а також необхідну інформацію, виконувати згідно з ГОСТ 12.4.026–76*.

8.1.4 Проектні рішення по будівельним конструкціям будівель та споруд

Всі несучі та захисні конструкції будівлі та споруд котельні, фундаменти будівлі котельні, надземна конструкція будівлі котельні виконуються відповідно до вимог нормативних документів.

Всі приміщення обладнані системами опалення, вентиляції, освітлення, що забезпечують нормативні параметри діючих стандартів.

Основне та допоміжне обладнання забезпечується засобами захисту, які відключають обладнання при аварійних ситуаціях.

При компонуванні обладнання враховані норми по організації робочих місць та евакуаційні проходи. Контроль виконання заходів по безпеці повинен виконуватися після закінчення монтажу, наладки і обкатки обладнання.

Місця проведення покрівельних робіт із застосуванням газо-полум'яного обладнання треба забезпечити комплектом засобів пожежогасіння.

Під час виконання робіт необхідно дотримуватись правил техніки безпеки.

8.1.5 Електробезпека

Проектні рішення по електробезпеці прийняті відповідно до «Правил будови електроустановок», «Правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок», ГОСТ 12.1.019–79 «Електробезпека. Загальні вимоги до номенклатури видів захисту», «Правилами захисту від статичної електрики (НПАОП 0.00–1.29–97)», «Інструкції по улаштуванню блискавко-захисту будівель і споруд» (ДСТУ Б В.2.5-38-2008) та іншими нормативними документами.

Для забезпечення захисту від випадкового дотику до струмоведучих частин використовуються наступні способи та засоби:

–захисні оболонки електроустаткування;

- захисні огороження, в основному стаціонарні;
- ізоляція струмоведучих частин та їхнє безпечне розміщення;
- знижена напруга для переносних світильників;
- попереджувальна сигналізація, блокування, знаки безпеки та інше.

Для забезпечення захисту від поразки електричним струмом при дотику до неструмовідних металевих частин, що можуть опинитися під напругою в результаті ушкодження ізоляції, застосовані наступні заходи:

- захисні занулення і заземлення;
- вирівнювання потенціалів;
- ізоляція частин, що проводять струм;
- контроль ізоляції, знижена напруга та інше.

Прийняте в проекті електротехнічне устаткування, апаратура, кабелі та провід, розподільчі пристрої усіх видів по своїм номінальним параметрам задовольняють умовам роботи, як при нормальних режимах, так і при коротких замиканнях, перенапругах і перевантаженнях.

Захисними заходами з захисту від блискавки, як для приміщення що у відповідності з ДСТУ Б В.2.5-38-2008 відноситься до II категорії, у проекті передбачаються:

- пристрій захисту від прямих ударів блискавки;
- захід з захисту від заносу високого потенціалу;
- захід з захисту від вторинних проявів блискавки.

До головних захисних заходів, передбачених у проекті також відносяться:

- головна система вирівнювання потенціалів на введенні в котельню;
- захід з захисту від проявів статичної електрики.

Захист від прямих ударів блискавки забезпечується улаштуванням блискавко-приймача з димової металевої труби заввишки 20 м (дивись технологічну частину проекту).

Захист від заносу високого потенціалу виконується шляхом приєднання технологічних трубопроводів на ввіді в будівлю до пристрою заземлення.

Захист від вторинних проявів блискавки виконується шляхом заземлення металевих конструкцій і корпусів проектного електрообладнання і контролюванням величин перехідних опорів у з'єднаннях елементів технологічних трубопроводів, що не повинні перевищувати 0,03 Ом на кожний контакт. При неможливості забезпечення контакту з вказаним перехідним опором за допомогою болтових з'єднань виконується улаштування сталевих перемичок із катанки Ø6.

8.1.6 Проектні рішення з безпеки управління технологічними процесами

Обсяги контролю, авторегулювання, керування, сигналізації і технологічного захисту реалізуються відповідно до вимог нормативних документів України, наданих в переліку міжгалузевих і галузевих нормативних актів про охорону праці.

Проект передбачає оснащення котла приладами, необхідними для організації економічної і безпечної експлуатації.

Керування технологічними процесами котлів здійснюється автоматично безпосередньо зі щитів керування котлами. Щити котлів та щити для керування допоміжним обладнанням котлів встановлено в приміщенні операторської.

Технічні засоби забезпечують:

- своєчасне одержання необхідної інформації про протікання технологічного процесу;
- майданчики на височині та сходи обладнані огороженнями;
- для забезпечення нормативної температури поверхні та зменшення непродуктивних втрат теплової енергії слід теплоізулювати обладнання та трубопроводи, які за умови регламентної експлуатації мають температуру зовнішньої поверхні більше 45 °С;
- все насосне обладнання резервується, що дозволяє уникнути або мінімізувати наслідки аварійної зупинки;
- котельня обладнана автоматичною системою контролю та безпеки, яка контролює технологічні параметри роботи обладнання, вимикає обладнання при виході параметрів, що контролюються, за встановлені межі та видає попереджувальні і аварійні сигнали;
- газоходи котельні повинні бути теплоізульовані, що мінімізує можливість утворення в них льодово-конденсатних корків та перешкоджання відведенню продуктів спалювання тріски.

8.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії.

8.2.1 Захист від виробничого шуму

Джерелами шуму в котельні є котли, дуттьові вентилятори, димососи, живильники котлів, насосне та інше обладнання, що впливають на персонал, який працює чи з'являється періодично в приміщенні котельні та на прилеглій території, а також в сусідніх з котельнею будівлях.

В проекті виконані акустичні розрахунки і визначена необхідність заходів по захисту від шуму робочих місць персоналу, а також прилеглої території.

В результаті проведених акустичних розрахунків визначено наступне.

1) Рівні звукового тиску в приміщенні котельні перевищують допустимі значення санітарних нормативів на 4,2 дБА.

Черговому та ремонтному персоналу, при знаходженні в котельні більш 4 годин за зміну, необхідно користуватися шумознижуючими навушниками, наприклад типу «ВЦ НИИОТ–2М», які знижують рівень звукового тиску на 7– 45 дБ по октавних смугах, або на 15,8 дБА.

2) Рівні звукового тиску в службовому приміщенні оператора котельні перевищують допустимі значення санітарних нормативів на 4,1 дБ по одній октавній смузі.

Для виконання нормативів допустимих рівнів шуму, в приміщенні оператора котельні рекомендується облаштувати, повністю або частково, підвісну стелю або покриття стелі (стін) з ефектом шумопоглинання.

Вимірювання шуму на робочих місцях виробничих приміщень проводити згідно ГОСТ 12.1.050–86.

8.2.2 Виробничі вібрації

Нормуються допустимі величини віброшвидкості (м/с) чи віброприскорення (м/с²), або логарифмічні рівні віброшвидкості $L = 20 \cdot \lg \left(\frac{V_i}{V_0} \right) [dB]$ (V_i - середньоквадратичне значення віброшвидкості за певний період часу, м/с; $V_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ м/с - вихідне значення віброшвидкості) залежно від частоти коливань, їх виду (транспортні, транспортно-технологічні та технологічні вібрації робочого інструменту, устаткування чи робочих місць), напрямку (X,Y,Z) і часу дії протягом робочої зміни.

Джерела вібрації в умовах, що розглядаються в проекті - вібрації від роботи димососа та вентилятора.

При цьому рівні вібрацій від роботи димососа та вентилятора не перевищують граничні допустимі рівні згідно ДСН 3.3.6-039-99, що відповідає доступному по нормам рівню вібрації, що дає можливість не використовувати додаткових захисних засобів.

8.2.3 Мікроклімат робочої зони

Мікроклімат у виробничих умовах визначається наступними параметрами: температурою повітря, відносною вологістю повітря, швидкістю руху повітря й інтенсивністю теплового випромінювання на робочому місці, температурою поверхні.

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99 встановлюють оптимальне й припустиме значення параметрів мікроклімату залежно від періоду року й категорії робіт (таблиця 8.1).

У таблиці наведені оптимальні й припустимі значення параметрів мікроклімату для категорій тяжкості робіт «Іа» (роботи, виконувані сидячи й не потребуючі фізичної напруги при витраті енергії не більше 120 ккал/година).

Опалення. Необхідна температура внутрішнього повітря у приміщенні котельного залу досягається за рахунок надходження теплонадлишків від запроектованого котла та обладнання. В якості чергового опалення котельного залу передбачається повітряне, опалювально-вентиляційним апаратом LEO FB 15 фірми "FLOWAIR".

Таблиця 8.1 — Оптимальні й допустимі параметри (для постійного робочого місця) мікроклімату в приміщенні.

Параметри	Холодний період		Теплий період	
	оптимальні	допустимі	оптимальні	допустимі
Температура °С	22-24	21-25	23-25	22- 28
Відносна вологість, %	40-60	80	40-60	75
Швидкість руху повітря, м/с	0,1	0,1	0,1	0,1-0,2

Вентиляція котельного залу запроектована припливно-витяжна з механічним та природним спонуканням повітря. Шкідливі речовини в приміщенні не зберігаються й не використовуються.

Фактичні параметри мікроклімату в робочій зоні відповідають приведеним вище нормам ДСН 3.3.6.042–99.

8.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

8.3.1 Оповіщення та евакуація

Згідно ст. 27 ПКМ від 15.02. 99 N 192 "Положення про організацію оповіщення і зв'язку у надзвичайних ситуаціях", в котельні передбачено:

—встановлення електросирен з можливістю централізованого запуску (місце встановлення: газова котельня);

—обладнання всіх виробничі, службові та адміністративні приміщення радіотрансляційними точками (радіоприймачами відповідного діапазону для районів, де немає проводового мовлення) для гарантованого приймання програм державного радіомовлення;

—безперешкодний допуск працівників, які здійснюють експлуатаційно-технічне обслуговування апаратури і технічних засобів оповіщення та зв'язку ЦО, за пред'явленими ними посвідченнями особи на територію та в приміщення своїх підприємств, установ і організацій для проведення ремонту або інших робіт, пов'язаних з технічною експлуатацією та обладнанням систем оповіщення.

Готовність систем оповіщення забезпечено шляхом:

—організованої цілодобової чергової операторів котельні;

—налагодження телефонного зв'язку чергових служб котельні з оперативно-черговою службою пункту управління облдержадміністрації та черговими службами органів Державної служби з надзвичайних ситуацій в місті Бориспіль;

—завчасної підготовки персоналу чергових служб до дій у надзвичайних ситуаціях;

- впровадження автоматизованих систем оповіщення з використанням сучасних технологій;
- якісного експлуатаційно-технічного обслуговування апаратури і технічних засобів оповіщення та системи зв'язку.

8.3.2 Дії персоналу при надзвичайних ситуаціях

Відповідно до вимог Кодексу цивільного захисту України робочим проектом передбачено комплекс технічних заходів з забезпечення підготовки персоналу до дій у надзвичайних ситуаціях за умовою регламентної експлуатації котельні. Серед них:

- планування та здійснення необхідних заходів для захисту своїх працівників, об'єктів господарювання;
- розроблення планів локалізації та ліквідації аварій з подальшим погодженням з Державною службою України з надзвичайних ситуацій;
- підтримання у готовності до застосування сил і засобів із запобігання виникненню та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій;
- створення та підтримання матеріальних резервів для попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій;
- забезпечення своєчасного оповіщення своїх працівників про загрозу виникнення або при виникненні надзвичайної ситуації.

Згідно, Кодексу цивільного захисту України, основною особливістю дій малих підприємств при загрозі або виникненні надзвичайних ситуацій є в першу чергу захист персоналу та відвідувачів. Виходячи з ст. 130 Кодексу цивільного захисту України, для котельні, як для підприємства з чисельністю персоналу 50 осіб і менше, передбачено:

- розробка та затвердження інструкцій щодо дій при загрозі або виникненні надзвичайних ситуацій. Розробка інструкції не повинна суперечити положенням та вимогам Кодексу цивільного захисту України. Інструкція розробляється та підписується посадовою особою підприємства з питань цивільного захисту, затверджується керівником підприємства та доводиться до всіх працівників під підпис;
- розробка та затвердження плану евакуації при пожежі або загрозі вибуху;
- внесення до посадових інструкцій працівників деяких конкретних заходів, що не відображені в нормативних документах підприємства;
- розробка та інформування всіх працівників з Порядком цілодобового оповіщення керівництва та працівників у випадку загрози або виникнення надзвичайної ситуації. Всі працівники підприємства повинні бути навчені діям, чітко знати свої обов'язки та неухильно їх виконувати. Це також стосується адміністрації малого підприємства, яка в екстремальній обстановці не може приймати помилкові рішення або віддавати необґрунтовані розпорядження.

Уникнути цього дозволить якісно розроблена Інструкція щодо дій персоналу малого підприємства при загрозі або виникненні надзвичайних ситуацій, наведена нижче.

8.3.3 Пожежна безпека

Пожежна безпека – стан об'єкта, за якого з регламентованою імовірністю виключається можливість виникнення і розвитку пожежі та впливу на людей її небезпечних факторів, а також забезпечується захист матеріальних цінностей.

Приміщення котельні згідно з НАПБ Б.03.002-2007 відноситься до категорії Д (пожежобезпечні – негорючі речовини та матеріали у холодному стані).

Відповідно до ПУЕ(ДНАОП 0.00-132-01) клас приміщення робочих зон з пожежонебезпеки - В-II (зони в приміщеннях, де виділяється пил чи волокна, що переходять у зважений у повітрі стан, у кількості і з такими властивостями, що вони здатні утворити з повітрям вибухонебезпечні суміші при нормальних режимах роботи).

Відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2004 «Правила пожежної безпеки в Україні» та ДБН В.1.1.7–2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» робочим проектом передбачено комплекс технічних заходів з забезпечення пожежної безпеки за умовою регламентної експлуатації котельні. Серед них:

- заходи з забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій;
- заходи з забезпечення доступу до котельні засобів пожежогасіння – автонасосів, автовишок та автоцистерн пожежної охорони;
- встановлення пожежних гідрантів на зовнішній мережі водопостачання;
- обладнання будівлі котельні системою автоматичної пожежної сигналізації;
- внутрішнього пожежогасіння, первинними засобами пожежогасіння;
- обладнання електроспоживаючого обладнання заземленням та зануленням;
- обладнання будівлі грозозахистом. Заходи з забезпечення вогнестійкості.
- встановлення в котельні сертифікованих протипожежних внутрішніх дверей ГОСТ 6629-88 (клас вогнестійкості Еі300):
- між котельним залом та приміщеннями щитів керування;
- між приміщенням щитів керування та котельним залом існуючої газової котельної;
- між приміщенням дизель-генераторної станції та механізованим складом палива.

Враховуючи конструктивну схему будівлі робочим проектом прийнято заходи з забезпечення вогнестійкості:

- фарбування елементів каркасу будівлі (колони та ферми покриття), в межах котельного залу, вогнезахисною фарбою;
- використання сандвіч-панелей з утеплювачем мінеральна вата;

—відділення котельного залу від частини будівлі, яка використовується в якості газової котельні протипожежною стіною.

Система автоматичної пожежної сигналізації та внутрішнього пожежогасіння котельні розробляється окремим проектом згідно ДБН В.2.5-56:2014. Згідно ДБН В.2.5-64:2012 п.8.1 проектом передбачене внутрішнє пожежогасіння котельні.

Пожежна безпека об'єкту забезпечується системою запобігання пожеж та системою протипожежного захисту.

Для захисту електрообладнання від короткого замикання проектом передбачено використання плавких запобіжників та релейних розчеплювачів.

Для електропроводки системи автоматизації проектом передбачені ізолюючі проводи та кабелі з алюмінієвими та мідними жилами. Проводиться огляд за справністю електропроводки.

Матеріали та вироби для теплоізолюючих конструкцій трубопроводів, арматури та обладнання печі є не горючими (використовується ізовер).

У приміщенні, де знаходиться твердопаливний котел:

- встановлено Щит з вогнегасником та пожежний кран з довжиною рукава 20 м;
- встановлений пожежний гідрант знаходиться на відстані 5 м від будинку;
- розміщено обладнання протипожежного водопостачання;
- для системи димовидалення передбачена витяжна вентиляція з механічним спонуканням;
- згідно вимог ДБН В.2.5-56-2014 встановлений сигналізатор загазованості безупинної дії.

Сигнал про загазованість подається в приміщення з цілодобовим перебуванням персоналу (диспетчерський пункт);

—передбачене освітлення основних проходів світильниками у вибухозахищеному виконанні, що включається при вході в помешкання тепlopункту. Вимикачі цих світильників виносяться з приміщення назовні.

Кількість, розташування та умови зберігання вогнегасників відповідають вимогам ДСТУ 3875-98 та 1803941-99. Мінімальний час евакуації відповідає СНП 2.01.02.85, СНП 2.09.02.85 та ДБН 1.1.007-2002.

В робочих приміщеннях виконані усі вимоги з пожежної безпеки відповідно до НАПБ А.01.001-2004 «Правила пожежної безпеки України».

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року: Безпека, Енергоефективність, Конкурентоспроможність. <http://www.kmu.gov.ua/control/uk/cardnpd?docid=250250456>
2. Державна служба статистики України. Енергетичний баланс України за 2016 рік (експрес-випуск № 506/0/08.4 вн-17) від 20.12.2017.
3. Державна служба статистики України. www.ukrstat.gov.ua.
4. Розпорядження КМУ від 18 серпня 2017 року № 569-р. <http://www.kmu.gov.ua/control/uk/cardnpd?docid=250218439>
5. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Інформаційна довідка: http://saee.gov.ua/sites/default/files/Renewable_energy_Ukraine_energy_balance_2016.pdf.
6. Наказ Мінприроди від 27.06.2006 р. N 309 «Про затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел». <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0912-06>
7. Аронов И.З., Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И.З. Аронов, // Л.: Недра. Ленинградское отделение. - 1990. - 280 с.
8. Баскаков А.П. Реальные возможности повышения энергетической эффективности газовых отопительных котельных / А.П. Баскаков, В.А. Мунц, Н.Ф. Филипповский, Е.В. Черепанова. // Промышленная Энергетика. - 2005. - №9. - С.22 - 26.
9. Бухаркин Е.Н. Обеспечение надёжных условий эксплуатации газоотводящего тракта в котельных с конденсационными экономайзерами / Е.Н. Бухаркин. // Теплоэнергетика. – 1997. – №9. – С.29 – 34.
10. Ефимов А.В. Математическая модель системы «котел–теплоутилизатор» / А.В. Ефимов, А.Л. Гончаренко. // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Тематический выпуск: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ «ХПИ» – 2010. – № 21. – С.76
11. Теплотехника / [Сушкин И.Н., Щукин А.А., Зах Р. Г. и др.]; под ред. И.Н. Сушкина. – [2-е изд. перераб.]. – М. – 1973. – 480 с. – (Курс общей теплотехники).
12. Ефимов А.В. Система глубокой утилизации теплоты газов, уходящих из котельных агрегатов [Текст] / А.В. Ефимов, А.Л. Гончаренко, Л.В. Гончаренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013.
13. О. Єфімов, Сучасні технології глибокого охолодження продуктів згорання палива в котельних установках їх проблеми та шляхи вирішення, Харків, Монографія, 2017.
14. Частухин 1980 г. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). Издание 3-е, переработанное и дополненное. Издательство НПО ЦКТИ, СПб, 1998 -256с.с ил.
15. ГКД 34.02.305-2002 (Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення), Чинний від 01.07.2002, УДК 662.611:66.074.3

ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації проаналізовано сучасний стан та перспективи розвитку сектору біоенергетики в Україні та основні способи підвищення екологічної ефективності роботи біопаливних котелень.

Визначено параметри димових газів на вході та виході з економайзера; встановлені залежності нижчої теплоти згоряння тріски та теоретично-максимального підвищення ККД системи «котел-економайзер» за рахунок утилізації теплоти димових газів від вологості палива; визначено значення температури точки роси димових газів.

–Виконано розрахунок теплової схеми біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль», в результаті якого визначено показники енергетичної ефективності котла та системи «котел-економайзер». Встановлено залежності ККД котла, ККД системи «котел-економайзер», витрати палива від різної вологості палива. Встановлено, що за рахунок встановлення економайзера: втрати теплоти з димовими газами зменшуються на 14,6%; ККД котельні збільшується на 13,6% (з 86,1% до 99,7% за нижчою теплотою згоряння); економія палива складає: при номінальному режимі (потужність котла – 5000 кВт) – 241,2 кг/год; при розрахунковому режимі (потужність котла – 2944 кВт) – 129,6 кг/год; при сталій витраті палива котельнею, кількість корисно використаної в системі «котел-економайзер» теплоти: при номінальному режимі (потужність котла – 5000 кВт) – 5700 кВт; при розрахунковому режимі (потужність котла – 2944 кВт) – 3350 кВт. Встановлено вплив вологості палива на ККД котла, витрату палива в котлі, ККД системи «котел-економайзер».

Виконано екологічний розрахунок біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль». Розрахунковими методами, визначено валові викиди забруднюючих речовин та їх концентрації, які співставляються з результатами реальних замірів концентрацій викидів забруднювальних речовин в атмосферу біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль». Згідно діючих нормативів для викидів оксидів азоту, оксидів сірки та оксидів вуглецю гранично допустимі концентрації не нормуються; при теоретичному розрахунку концентрацій викидів забруднюючих речовин: масові викиди твердих частинок перевищують граничне значення 500 г/год, тому гранично допустимі концентрації викидів твердих частинок мають бути менші за 50 мг/м³; за результатами реальних замірів концентрацій викидів забруднюючих речовин: масові викиди твердих частинок не перевищують граничне значення 500 г/год, тому гранично допустимі концентрації викидів твердих частинок мають бути менші за 150 мг/м³.

–Під час експериментального дослідження роботи біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль», було оброблено дані 24 режимів роботи котельні у період січень-квітень 2017 року. Встановлено залежність потужності економайзера від потужності котла, температури вхідної води

в економайзер, різниці температур води на вході та виході в економайзер; залежність температури у подаючому та зворотньому трубопроводах від температури навколишнього середовища. Встановлено, що при збільшенні потужності котла на 2 МВт (від 3МВт до 5МВт), потужність економайзера зросла на 100 кВт (від 520 кВт до 620 кВт); при зменшення температури вхідної води в економайзер на 10°C (від $52,5^{\circ}\text{C}$ до $42,5^{\circ}\text{C}$), потужність економайзера зросла на 350 кВт (від 340 до 690 кВт); при збільшенні різниці температур води на вході та виході в економайзер на 3°C (від 4°C до 7°C), потужність економайзера зросла на 350 кВт (від 350 до 700 кВт); при збільшенні температури навколишнього середовища на $13,6^{\circ}\text{C}$ (від $-6,9^{\circ}\text{C}$ до $6,7^{\circ}\text{C}$), температури води у подаючому трубопроводі економайзера знизилась на 6°C (від 50°C до 44°C). Отже, потужність економайзера збільшується пропорційно до збільшення потужності котла, до зменшення температури вхідної води в економайзер, до збільшення різниці температур води на вході та виході в економайзер, до збільшення температури навколишнього середовища.

На базі програмного забезпечення Solid Works побудовано геометричну модель економайзера, перевірено коректність комп'ютерного моделювання, досліджено теплообмін між потоками рідини в економайзері та визначено розподіл температур для варіантів: без перегородок по ходу робочого тіла – води, та з ними, виявлено частини економайзера, у яких інтенсивність теплообміну може бути збільшена, виконано конструктивну зміну в економайзері для збільшення інтенсивності теплообміну та оцінено результати моделювання. З урахуванням збільшення інтенсивності теплообміну конструктивні зміни в економайзері є доцільними.

Розроблено стартап проект «Встановлення економайзера для глибокого охолодження димових газів в біопаливних котельнях», в якому визначено економічну ефективність утилізації теплоти димових газів в економайзері – 3421 тис. грн/рік та термін окупності – 3,3 року.

Запропоновані технічні рішення та організаційні заходи з безпеки експлуатації технологічного обладнання, з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії; визначені основні заходи з пожежної безпеки та профілактики.

Додаток А

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан теплоенергетичного факультету КПІ
ім. Ігоря Сікорського

_____ Є.М.Письменний

«___» вересня 2016 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора

ТОВ НТЦ «Біомаса»

_____ Ю.Б. Матвеев

«___» вересня 2016 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на науково-дослідну роботу

«Підвищення ефективності біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль»»

1. Термін виконання роботи

Початок – 1.09. 2016 р.

Закінчення – 14.05. 2018 р.

2. Обґрунтування для виконання роботи

Одними з найактуальніших завдань, що стоять перед державою останніми роками, є скорочення споживання дорогого імпортного палива – природного газу, а також збільшення частки використання відновлюваних джерел енергії. У зв'язку з вирівнюванням тарифів на природний газ та підняттям тарифів на теплову енергію економічна доцільність заміщення газу біомасою постійно зростає. Основною можливістю залучення біомаси в енергосектор, на сьогодні, полягають у її використанні у якості палива при виробництві теплової енергії для забезпечення потреб споживачів в опаленні та гарячому водопостачанні.

В Україні актуальним на сьогодні питанням – є розробка та впровадження енергозберігаючих теплотехнологій у секторі виробництва теплової енергії з біомаси, що дозволять знизити рівень енергоспоживання на одиницю національного валового продукту. Однією з таких теплотехнологій є утилізація теплоти димових газів за рахунок глибокого охолодження продуктів згорання.

В роботі передбачається проаналізувати роботу водогрійної опалювальної котельні, в якій встановлено водогрійний твердопаливний котел виробництва корпорації ІНКА (Харків), тепловою потужністю 5000 кВт та економайзер для глибинного охолодження димових газів групи компаній Enerstena (Литва), тепловою потужністю 1000 кВт.

3. Мета роботи

Розрахувати повне згорання різних видів біопалива різної вологості, та визначити кількість теплоти конденсації всієї пари, яка утворюється при цьому. Виконати тепловий розрахунок системи «котел–економайзер» біопаливної котельні та визначити основні показники ефективності

її роботи. Проаналізувати експериментальні дані режимів роботи біопаливної котельні і визначити залежності потужності економайзера від температури у подаючому та зворотньому трубопроводах та від вологості палива.

4. *Зміст основних етапів виконання роботи*

4.1. Сучасний стан питання підвищення показників ефективності роботи біопаливних котелень.

4.2. Розрахунок повного згоряння різних видів палива різної вологості. Визначення параметрів димових газів на вході в економайзер. Розрахунок температури точки роси димових газів на вході в економайзер.

4.3. Тепловий розрахунок системи «котел–економайзер»

4.4. Розрахунок екологічної ефективності системи «котел–економайзер»

4.5. Підготовка та проведення серії експериментів. Обробка результатів експериментів

4.6. Моделювання процесу теплообміну в економайзері за допомогою програмного забезпечення Solid Works.

4.7. Розробка стартап-проекту

4.8. Охорона праці

5. *Матеріали, що подаються після закінчення роботи*

5.1. Магістерська дисертація.

5.2. Презентація.

5.3. Довідка про впровадження результатів.

6. *Порядок розгляду і приймання роботи*

Результати роботи розглядаються на засіданні ЕК із захисту атестаційних робіт освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 144 «Теплоенергетика», спеціалізацією «Промислова та муніципальна теплоенергетика і енергозбереження».

Керівник роботи

_____ доц., І.О. Назарова

(підпис) (посада, ініціали, прізвище)

«_____» _____ 2016 р.

Виконавець

Студент гр. ТП-61м,
ТЕФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського

_____ С.Г. Гелету́ха
(підпис) (ініціали, прізвище)

«_____» _____ 2016 р.

Додаток Б**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Заступник директора

ТОВ НТЦ «Біомаса»

_____ Ю.Б. Матвеєв

«___» травня 2018 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Результатів магістерської дисертації на здобуття ступеня магістра
студентки Гелетуки С.Г.

Результати магістерської дисертації студентки кафедри ТПТ, ТЕФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Гелетуки Софії Георгіївни, упровадженні в ТОВ НТЦ «Біомаса» в частині оцінки енергетичної та екологічної ефективності роботи водогрійних біопаливних котелень систем централізованого та помірно-централізованого теплопостачання при глибокому охолодженні димових газів в поверхнево-контактних економайзерах.

Додаток В

Ф.№ 3.3

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Гелетуки Софії Георгіївни

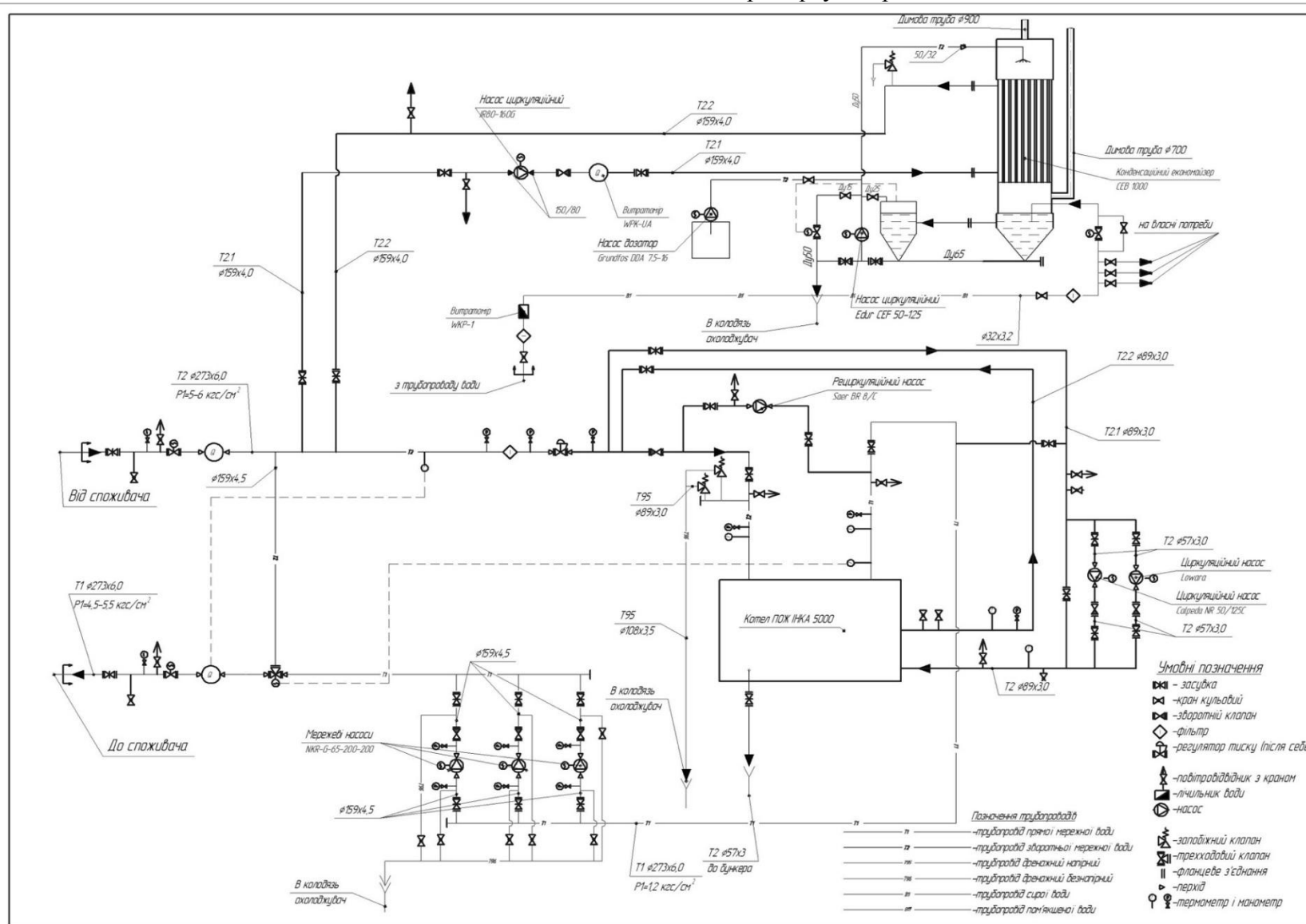
№ п/п	Найменування праць	Рукописні або друковані	Назва видавництва, журналу (номер, рік) або номер авторського свідоцтва, номер диплома на винахід	Кількість друкованих аркушів або сторінок разом	Прізвища співавторів у праць
1	2	3	4	5	6
1.	Application of economizer in biomass boiler house in boryspil airport: case study	Друк.	Збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Розвиток технічних наук: проблеми та рішення» 27–28 квітня 2018 року, місто Брно (Чеська Республіка). – 2018. – с.164	1 стор	Назарова І.О.
2.	Моделювання процесу теплообміну в економайзері для глибинного охолодження димових газів за допомогою програмного забезпечення Solid Works	Друк.	XVI міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, м. Київ, 24-27 квітня 2018 р.» – ел. посібник. – 2018. – с.87	1 стор	Назарова І.О.
3.	Heat recovery from biofuel boiler exhaust flue gas	Друк.	XVIII всеукраїнська студентська науково – практична конференція “Наука та техніка XXI століття”. Матеріали XVIII всеукраїнської студентської науково – практичної конференції “Наука та техніка XXI століття”, м. Київ, 07 грудня 2017 р. – с.64	1 стор	–
4.	Джерела холодної води економайзера для глибинного охолодження димових газів	Друк.	XV міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». Тези доповідей конференції, м. Київ, 25-28 квітня 2017 р.» – ел. посібник. – 2017. – с.143	1 стор	Назарова І.О.
5.	Аналіз показників енергетичної ефективності теплових процесів і установок	Друк.	XV міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». Тези доповідей конференції, м. Київ, 25-28 квітня 2017 р.» – ел. посібник. – 2017. – с.142	1 стор.	Куделя П.П.

1	2	3	4	5	6
6.	Оптимизация работы экономайзера по энергоэкологическим показателям на котлах ЖКХ	Друк.	XV міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів, студентів «Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения». Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, м. Астана, 29-30 червня 2017 р.	2 стор	Варламов Г.Б., Назарова І.О.
7.	Аналіз сектору централізованого теплопостачання країн Європейського Союзу	Друк.	XIV міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, м. Київ, 18-21 квітня 2016 р. – ел. посібник. – 2016. – С.171	1 стор	Назарова І.О.
8.	Економічна доцільність використання твердопаливних котлів в опалювальній котельні для теплопостачання житлового масиву	Друк.	XIV міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, м. Київ, 21-24 квітня 2015 р. – ВАТ „Володимирецька друкарня”.– 2015. – с.133	1 стор	Назарова І.О.

Список наукових праць Гелетути С.Г.: усього 8 найменувань, список наведений на 3 сторінках.

Автор

Гелетути С. Г.



Додаток Д
Режимна таблиця роботи економайзера СЕВ 1000 біопаливної котельні аеропорту
«Бориспіль»

7 Режимная таблица
Конденсационный экономайзер СЕВ 1000 Р1548

	Параметры	Ед. Изм.	
1	Средняя нагрузка котла	MW	≥ 5
2	Мощность экономайзера	MW	0,65
3	Объем воды	m ³ /h	89,67
4	W12-BT3 температура термофиката перед экономайзером	°C	39,40
5	W12-BT4 температура термофиката за экономайзером	°C	45,80
6	W12-(BT4-BT3) Δt термофиката перед и за экономайзером	°C	+ 5
7	W07-BT1 Температура дымовых газов перед экономайзером	°C	78,00
8	W07-BT2 Температура дымовых газов за экономайзером	°C	41,40
9	W07-BP2 Давление/тяга дымовых газов перед экономайзером	Pa	+1139,7
10	W07-BP3 Давление/тяга дымовых газов за экономайзером	Pa	-11
11	W16-BL1 Уровень конденсата в экономайзере	%	95,00
12	W16B1-AI pH конденсата в экономайзере	pH	6,50
13	Уровень открытия запорного клапана W16R1с эл.приводом регулирования уровня конденсата	%	26,70

Составил: UAB "Enerstena VS"

Inžinierius derintojas
Igoris Liapins

Додаток Е

Результати вимірів концентрацій забруднюючих речовин в атмосферне повітря біопаливної котельні аеропорту «Бориспіль»

Форма затверджена наказом
Мінекоресурсів України
від 19 квітня 2013 року № 179

ЕКОЛОГІЧНА ЛАБОРАТОРІЯ ТОВ «НВП «ЕКОЗАХИСТ»

м. Київ, вул. Механізаторів, 2

Телефон 044-496-01-20

ПРОТОКОЛ № 95

вимірювань вмісту забруднюючих речовин в організованих викидах стаціонарних джерел від «31» березня 2015 р.

Відповідно до відібраних проб 26 березня 2015р. Екологічною лабораторією ТОВ «НВП «Екозахист», атестованою на право виконання вимірювань (Свідоцтво про атестацію № ПТ-212/14 від 25 червня 2014р., видане : ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ») проведено вимірювання вмісту забруднюючих речовин (ЗР) в організованих викидах стаціонарних джерел.

ТОВ «КИЇВ ГРІН ЕНЕРДЖІ»

м. Бориспіль, ДП МА «Бориспіль»

(назва підприємства, відомча підпорядкованість, адреса)

1 Відбір проб та вимірювання проведені відповідно до:

- КНД 211.2.3.063-98 “Метрологічне забезпечення. Відбір проб промислових викидів. Інструкція”;

- методик виконання вимірювань (МВВ), допущених до використання та наведених у «Переліку методик виконання вимірювань (визначень) складу та властивостей проб об'єктів довкілля, викидів, відходів і скидів, тимчасово допущених до використання Мінприроди України», чинний з 02.01.2008р. по 31.12.2012р. (далі - «Перелік»). Шифри застосованих МВВ за «Переліком» наводяться в розділі 5 «Результати вимірювань»;

- МВВ, що не увійшли до «Переліку» _____.

2. При вимірюванні застосовані такі основні засоби вимірювальної техніки (ЗВТ):

- Вимірювач швидкості газових потоків ИС-1, №662, свідоцтво №22.00/1487806 чинне до 23.07.2015р.;

- Мікроманометр ММЦ-200, №651, свідоцтво №39-02/1089 чинне до 23.07.2015р.;

- Трубка ТН-1,0 НИОГАЗ, тавро в паспорті чинне до 17.07.2015р.;

- Газоаналізатор ОКСИ 5М-5Н, №120456, свідоцтво №12-02/0562 чинне до 16.04.2015р. та №12-02/0681 чинне до 19.05.2015р.;

- Установка пневматична УП-2224 АС, тавро в паспорті чинне до 09.2015р.;

(назва, тип, заводський номер, відомості про повірку)

3. Перерахунок вмісту ЗР у викидах паливовикористовуючого обладнання на відповідну об'ємну частку кисню, виконаний відповідно до ГОСТ 10617-83.

4. Назва документа, що регламентує значення нормативів викидів, наведених в розділі 5.-



Арк. 1, всього аркушів 2

**Результати вимірів концентрацій забруднюючих речовин
у викидах в атмосферне повітря ТОВ «КИЇВ ГРІН ЕНЕРДЖІ» м. Бориспіль, ДП МА «Бориспіль»**

Дати відбору проб та вимірюван ня	Назви виробництва, цеху, дільниці, джерела утворення ЗР, характеристика та навантаження під час відбору проб	Номер, назва ДВ, ДУ: місце відбору проб та D або A x B перерізу газоходу, м	Параметри газопилового потоку (у місці відбору проб)				Назва ЗР	Ном ер об'є дн про би	Масова концен- трація ЗР ρ_v		Масова випрата викиду ЗР q_m , г/с	Норматив викиду			Відомості про MBV								
			темпе- ратура t_r , °C	швид- кість v , м/с	об'ємна випрата qv_0 , м³/с	вміст кисню ϕ_{O_2} , %			мг/м³	у пере- рахунку на α % мг/м³		ρ_v , мг/м³	ρ_v у пере- рахунок у на мг/м³	випрата викиду ЗР q_m , г/с	шифр MBV	похибка вимірювання, δ % (Δ) $P=0.95$							
																концен- трації ЗР ρ_v	масової випрати q_m						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
26.03.15.	Котел твердопаливний ПОЖ ИНКА потужністю 5000 кВт, паливо- соснова щепи CO ₂ =13,5 % λ =1,89	Труба D=1,0 (після ГОУ)	56	2,9	1,846	9,9	Оксид вуглецю			(ϕ_{O_2} =6%)		250			ОКСИ 5М-5Н	±(12,5)	±16						
								1	176,25	238,2	0,32536												
								2	173,75	234,8	0,32074												
								3	177,50	239,9	0,32767												
								4	180,00	243,2	0,33228												
							5	178,75	241,6	0,32997			Оксиди азоту (оксид та діоксид азоту) у перерахунку на діоксид азоту	1	194,8	263,2	0,35960	500			ОКСИ 5М-5Н	±(20,5)	±22
							2	192,7	260,4	0,35572													
							3	196,8	265,9	0,36329													
							4	195,1	263,6	0,36015													
							5	199,2	269,2	0,36772				Діоксид сірки (діоксид та триоксид) у перерахунку на діоксид сірки	1	нчм	-		-	500			
							2	нчм	-	-													
							3	нчм	-	-													
							4	нчм	-	-													
							5	нчм	-	-			Пил (речовини у вигляді суспендованих твердих частинок недиференційо- ваних за складом)		1	25,10	33,92	0,04633	150				MBV 081/12- 0161-05
							2	24,31	32,85	0,04488													
							3	24,04	32,49	0,04438													
							4	24,57	33,20	0,04536													
							5	24,83	33,55	0,04584													

^{*)} qv_0 - об'ємна витрата, зведена до нормальних умов.

^{**)} δ - позначення характеристик відносної похибки та Δ - позначення характеристик абсолютної похибки при довірчій ймовірності $P=0.95$.

Примітка.

Начальник лабораторії

Виконавці

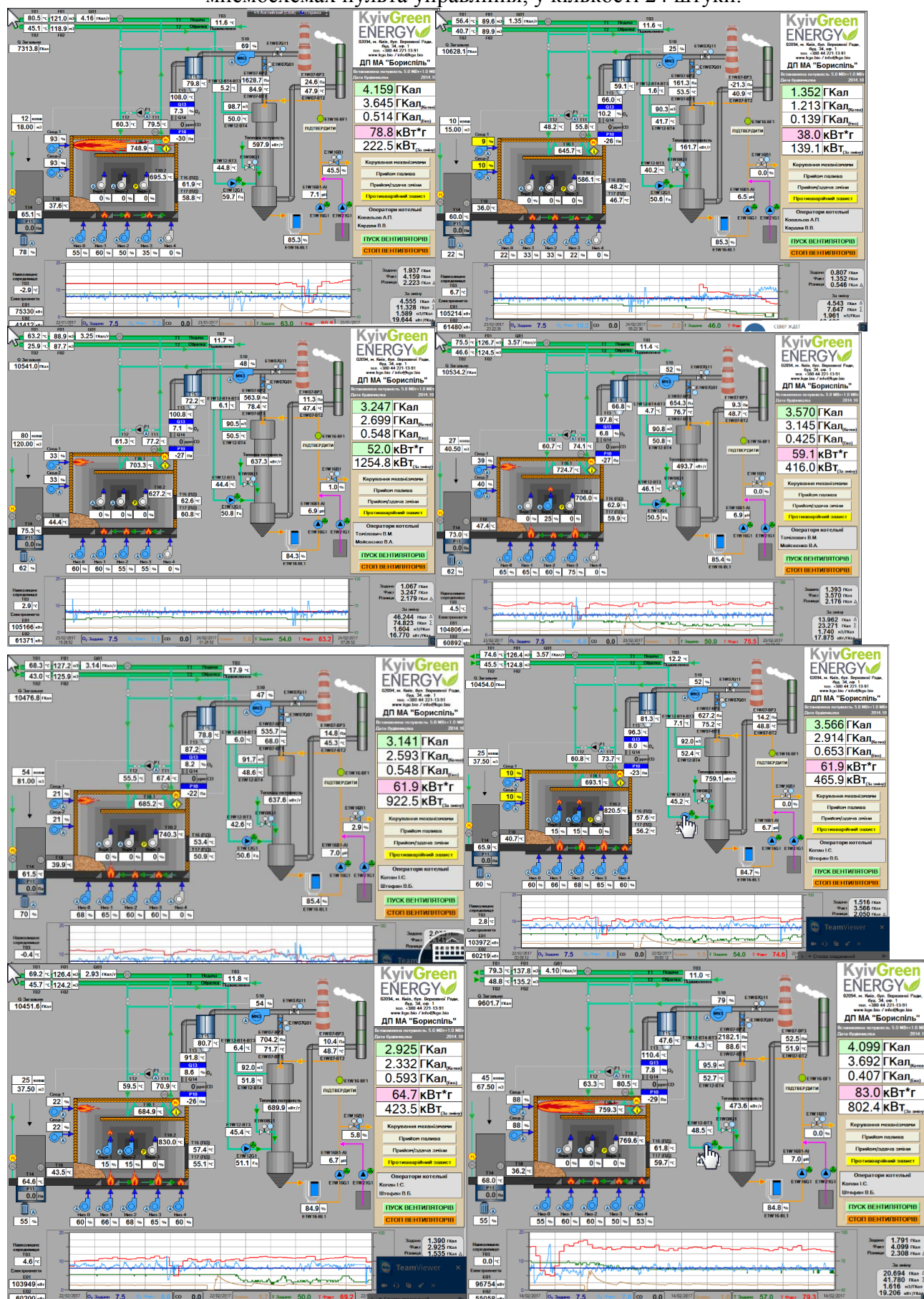
Сивенко М.О.

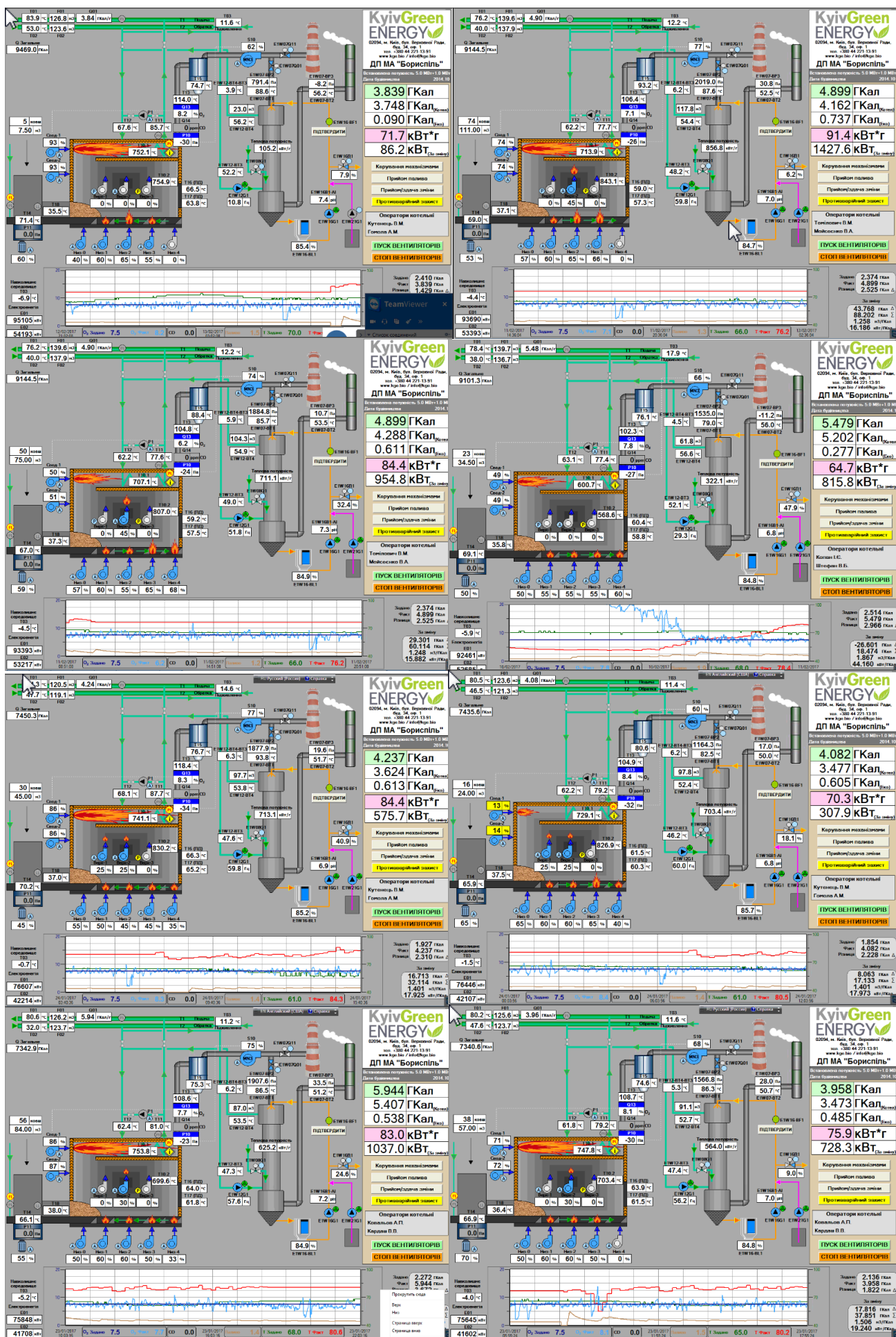
Сивенко М.О.

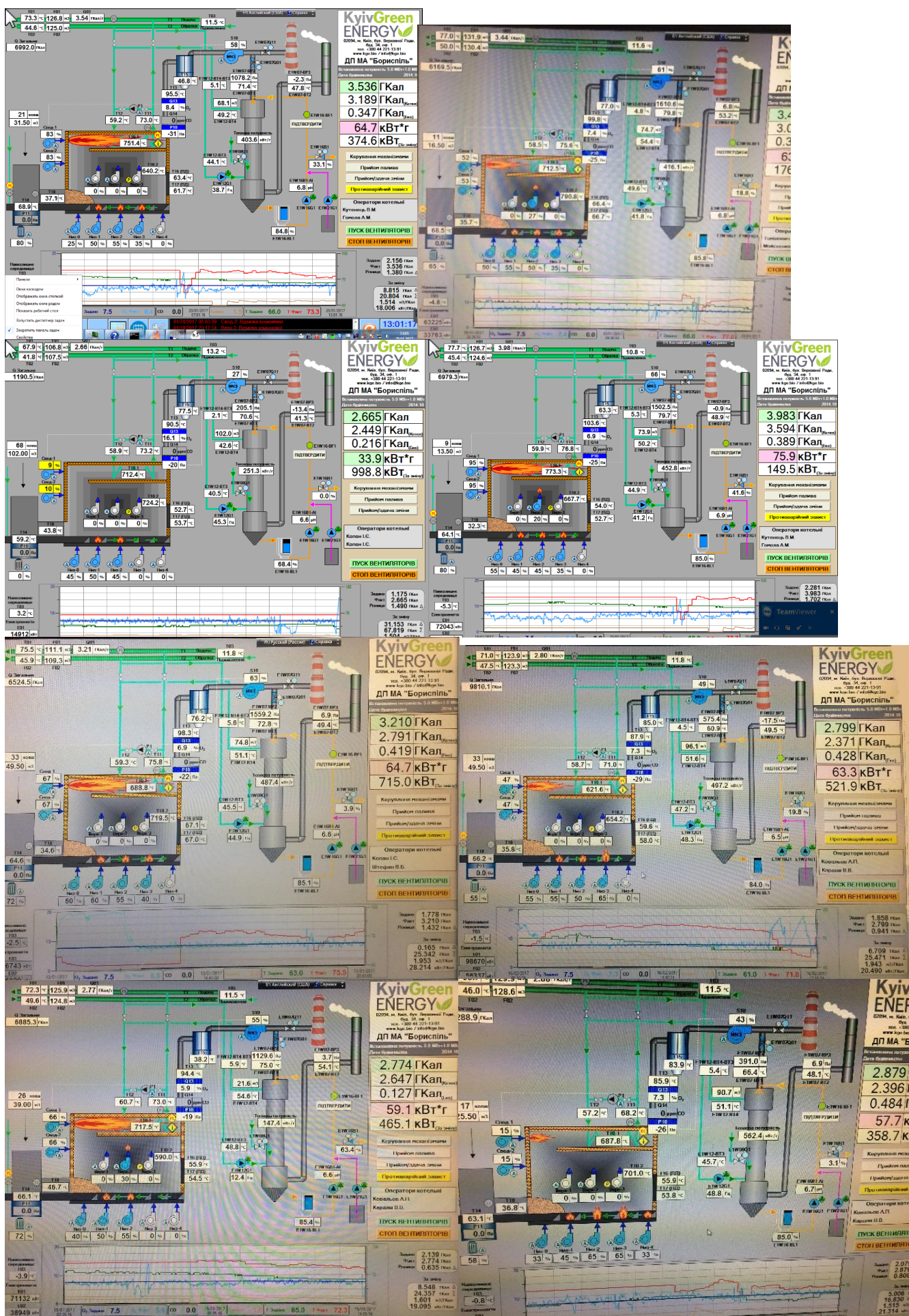
Оксак Ю.Ю.

Додаток Ж

Режимні параметри роботи біопаливної котельні з економайзером, представлені на мнемосхемах пульта управління, у кількості 24 штуки.







Додаток 3

Витяг із звіту по перевірці магістерської дисертації на академічний плагіат в системі Unicheck



2 ТЕПЛОВА СХ...

Завантажено: 05/11/2018

Перевірено: 05/11/2018

Інтернет + Бібліотека

94.09% Оригінальність	5.91% Схожість	508 Джерела
-----------------------	----------------	-------------

Джерела з Інтернет : 463 джерела знайдено

1. http://web.kpi.kharkov.ua/pgs/wp-content/uploads/sites/83/2014/08/Monografiya-Sovremennyye-tehn...	1.85%
2. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93461/capitulo04.PDF	1.15%
3. http://docplayer.nl/69055859-Zelforganisatie-in-teams.html	1.13%
4. http://www.kpi.kharkov.ua/archive/%D0%BD%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%...	1.03%
5. http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/3760/1/vestnik_HPI_2013_13_Yefimov_Siste...	1.03%
6. http://www.answers.com/Q/What_is_the_opposite_of_multiplication	1%
7. http://www.mandel.be/websites/1/uploads/file/Tweezijdig/de-mandel-het-reglement-van-inwendige-o...	0.99%
8. https://www2.gwu.edu/~forcpgm/Ortman.pdf	0.99%
9. http://marienveldsbelang.nl/wp-content/uploads/EindRapport_EnqueteBL.pdf	0.99%
10. https://prod-8f86.kxcdn.com/s1/20171124-2434/help/examples/report-nl.pdf	0.99%
11. https://engineering.purdue.edu/ISS/Publications/DSc_Dissertations/Shirley_Dyke.pdf	0.97%
12. http://cnap.gov.ua/sites/default/files/02_prezentaciya_opituvannya_pracivnikiv_cnap_lviv.pdf	0.97%
13. https://www.scribd.com/document/2279694/Visual-Studies	0.95%
14. https://core.ac.uk/download/pdf/29400186.pdf	0.95%
15. https://www.slideshare.net/Isleon/envejecimiento-activo-49663671	0.94%
16. http://www.housingauthority.gov.hk/tc/common/pdf/business-partnerships/resources/concrete.pdf	0.92%
17. http://docplayer.nl/63572869-Add-en-onderwijs-student-enquete.html	0.92%
18. http://dsp-book.narod.ru/WVT/BZ.pdf	0.91%
19. http://acyja.com/documentos/Comunicaciones_Congresos/Comunicaciones/2010/DOP18-P-Abril...	0.88%
20. https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/6368/wps4504.pdf	0.85%
21. http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/16300/33-Pyvovar.pdf?sequence=1	0.83%
22. http://www.thruway.ny.gov/about/financial/monthly/2017/supplementals/sept2017supplements.pdf	0.83%
23. http://www.google.com/patents/US9034632	0.82%
24. http://www.thruway.ny.gov/about/financial/monthly/2012/supplementals/augsupplements.pdf	0.81%
25. http://docplayer.ru/54487156-Energetichni-ta-teplotehnichni-procesi-y-ustatkuvannya-sistema-glub...	0.78%
26. http://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/8521/201200000674.pdf.txt?sequence=3	0.74%
27. http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16373/9/Microsoft%20Word%20-%209.PROBLEMAS%2..	0.73%
28. http://archimedes.teithe.gr/downloads/csndsp_2.pdf	0.73%
29. http://www.espatentes.com/pdf/2199457_t3.pdf	0.72%
30. https://patents.google.com/patent/ES2589123T3/es	0.72%
31. http://patentae.com/20151126/moldeo-preimpregnado-fibra/d	0.72%
32. https://patents.google.com/patent/ES2606297T3/es	0.72%
33. https://patents.google.com/patent/ES2594830T3/es	0.72%
34. http://patentae.com/20151210/m%C3%A9todos-para-identificar-celular/d	0.72%
35. https://patents.google.com/patent/ES2600555T3/es	0.72%
36. https://patents.google.com/patent/ES2562933T3/es	0.72%
37. https://patents.google.com/patent/ES2569339T3/es	0.72%
38. https://patents.google.com/patent/ES2617777T3/es	0.72%
39. https://samssatact.files.wordpress.com/2016/07/sat-reading-practice-1.pdf	0.68%
40. https://vdocuments.site/documents/tesis-completa-ingenieria-mecanica.html	0.68%
41. http://amm.net.ua/docs/ap-mira15/9.pdf	0.67%
42. https://olis.leg.state.or.us/liz/201311/Downloads/CommitteeMeetingDocument/37132	0.65%
43. http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC21207/EUR%2019754%20EN.pdf	0.6%
44. https://vdocuments.site/documents/0658633000000000.html	0.59%

Схожість
Схожість з обраним джерелом
Заміна літер абетки

Цитата
Посилання